



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE**

**GEOFÍSICA APLICADA PARA A CARACTERIZAÇÃO
DA COBERTURA PEDOLÓGICA DE UMA
VERTENTE NA REGIÃO DE DOM AQUINO-MT.**

MÁRIO JOSÉ PEREIRA

PROF.DR. SHOZO SHIRAIWA

Orientador

Cuiabá, MT junho de 2005.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE**

**GEOFÍSICA APLICADA PARA A CARACTERIZAÇÃO
DA COBERTURA PEDOLÓGICA DE UMA
VERTENTE NA REGIÃO DE DOM AQUINO-MT.**

MÁRIO JOSÉ PEREIRA

*Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Física e Meio
Ambiente da Universidade Federal de
Mato Grosso, como obtenção do título de
Mestre em Física e Meio Ambiente.*

PROF.DR. SHOZO SHIRAIWA

Cuiabá, MT junho de 2005.

FICHA CATALOGRÁFICA

P436g Pereira, Mário José
Geofísica aplicada para a caracterização da cobertura pedológica de uma vertente na região de Dom Aquino-MT / Mário José Pereira.- 2005.
xix, 85p. : il. ; color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, 2005.

“Orientação Profº. Dr. Shozo Shiraiwa”

CDU – 550.837.7(817.2)

Índice para Catálogo Sistemático

1. Exploração geofísica – Radar de penetração – Métodos
2. Geofísica – Técnicas de exploração
3. Prospecção – Métodos elétricos
4. Prospecção geométrica
5. Radar de penetração no solo (GPR) – Dom Aquino (MT)
6. Sondagem elétrica vertical (SEV) – Dom Aquino (MT)
7. Toposeqüência
8. Dom Aquino (MT) – Tipos de solos - Geofísica
9. Comportamento hídrico do solo – Dom Aquino (MT)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Geofísica Aplicada Para a Caracterização da Cobertura Pedológica de uma Vertente na Região de Dom Aquino-MT.

MÁRIO JOSÉ PEREIRA

Dissertação submetida ao corpo docente da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação UFMT: Universidade Federal de Mato Grosso/Instituto de Ciências Exatas e da Terra-Departamento de Física/Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente/ Linha de Pesquisa/ HidroGeo.

Aprovada por:

Prof. Dr. Shozo Shiraiwa

Prof. Dr. Jorge Luis Porsani

Prof. Dr. Fernando Ximenes de Tavares Salomão

CUIABÁ, MT JUNHO DE 2005

“A crença absoluta no poder das idéias, na confiança total na ciência e na certeza de que a educação intelectual é o único caminho legítimo para melhorar os homens, para transformar a nação, para ilustrar o país”.

BARAT, A, M.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,

Primeiramente in memoriam ao meu querido pai que sempre me incentivou para que eu pudesse seguir nos estudos cada vez mais, a minha querida mãe que nos deixou recentemente, com carinho, com sacrifícios, tornaram possível minha educação,

Aos meus irmãos

que, junto deles, sempre me apoiaram, estimularam e dispensaram sincera amizade, a minha irmã mais velha pela confiança e pelo estímulo e principalmente pelo amor que sempre me dedicou,

Aos meus filhos

Mariana e Bruno pelo carinho, amor e muito sacrifício por tudo que passamos durante a longa trajetória de meus estudos,

Ao meu amor

Cecília que sempre me apoiou em tudo, pela ternura, pelo carinho e principalmente pelo sacrifício e dedicação e que será a grande incentivadora de todos os projetos de vida.

AGRADECIMENTOS

- À UFMT-Universidade Federal de Mato Grosso; ao apoio logístico (transporte) no projeto.
- À FACUAL-Fundação de Apoio Cultural do Algodão; ao apoio financeiro e logístico no projeto.
- À AMPA-Associação Matogrossense dos Produtores de Algodão; ao apoio financeiro no projeto.
- À CAPES-Apoio financeiro no projeto.
- Aos professores Dr. Jorge Luís Porsani e Dr. Vagner Roberto Elis do IAG/USP, por suas valiosas colaborações no processamento e interpretação de GPR, curso no IAG e ajuda na orientação desta Dissertação; e também, principalmente por suas amizades e coleguismo.
- Aos professores Dr. Shozo Shiraiwa e Dr. Alteredo Oliveira Cutrim por suas amizades, coleguismo e principalmente por suas valiosas colaborações no referido trabalho, na orientação e co-orientação desta dissertação;
- Aos professores Dr. Fernando Ximenes de Tavares Salomão e Ms. Elder Madruga IRS. , por suas valiosas colaborações na área de solo e da água do referido trabalho; principalmente por suas amizades e coleguismo.
- Diretor do ICET, Prof. Ms. Carlos Antonio Dornellas, por sua amizade, coleguismo e principalmente por suas valiosas colaborações no referido trabalho;
- Aos professores Ms. Renato Maranhão Ayres, in memoriam, ao Ms. Edgar Francisco de Oliveira, por suas amizades, companheirismo, apoio, coleguismo, sucesso pessoal, profissional e principalmente por sua grandiosa ajuda no referido trabalho;
- Aos professores Dr. Renato Blat Migliorini e a professora Ms. Maria da Anunciação Pinheiro Barros Neta, Dr. Kurt João Albrecht, Dr. Ricardo K. Weska, Dr. Renato Neder, Ms. José Carlos de Arruda, Ms. Álvaro Pizzato Quadros, Ao amigo Doutorando. Welington Rodrigues Borges do IAG/USP ao Ir. Ms. José Manoel de Almeida Filho e ao Dr. Luiz Airtton Gomes, Ms. Geraldo Queirós Guimarães, Rodrigo Meirelles Mattos Rodrigues e Esp. José Joaquim de Souza Neto, por suas amizades, coleguismo e principalmente por suas valiosas colaborações, no referido trabalho;

- Aos professores do Projeto da FACUAL Aos professores Dr^a. Eliana Freire Gaspar de Carvalho Dores, Dr^a. Oscarlina Lúcia dos Santos Weber, Dr. Antonio Brandt Vecchiato, Ms. Alicio Alves Pinto, Eng. Agrônomo Dr. Cláudio Spadotto, Eng. Agrônomo Antonio Carlos Carvalho Dores e ao (DCR) Dr. Ricardo Santos Silva Amorim, MS. Leandro Carbo e Ms. Marcelo Luis Ferreira Cunha, a secretária Leila Nunes Leal, pela convivência e aos discentes do Curso de Química da UFMT, Marcos Pivatto, Gisele Cristina de Castro, Adley Bérqson Gonçalves de Abreu, Denise Grazielle Góis Santos, Luana de Souza, Eucarlos de Lima Martins, Aos discentes do Curso de Geologia da UFMT, Karen Cristina O. Gonçalves, Sergio Junior da Silva Fachin, Félix Huber, Tânia Helena Marcelino, Claudia de Oliveira e Livia Fernandes Chaves Santos por suas amizades, convivência e principalmente por suas valiosas colaborações no referido trabalho;
- Aos professores do Departamento de Química/ICET/UFMT, em especial aos meus amigos, Ms. Evando Salmo da Silva, Esp. Edvaldo Valeriano de Campos Filho, Ms. Luiz Werner Reuter Torro, Dr^a. Nair Honda Kawashita, Dr. Edinaldo de Castro e Silva, Dr. Evandro José da Silva e ao Ms. Wilson Dias da Silva, por suas amizades, coleguismo e principalmente por suas valiosas colaborações no referido trabalho;
- Aos meus colegas, amigos e professores do Curso de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, em especial aos Prof. Dr. José de Souza Nogueira e a Prof^a. Dr^a. Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira, ao Prof. Luiz Fernando Jorge da Cunha, da UNEMAT, Fernanda Marcielli Santos e Márcia Klein, pela agradável convivência nesta caminhada de tantos sacrifícios e abnegação, grato pela colaboração no referido trabalho, e a todos os outros no transcorrer do curso.

SUMÁRIO

EPÍGRAFE	iv
DEDICATÓRIA	v
AGRADECIMENTOS	vi
SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS	xvii
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS, GEOMORFOLÓGICOS, PEDOLÓGICOS DA ÁREA OBJETO	5
2.2 CLIMA E VEGETAÇÃO	10
2.3 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DA ÁREA OBJETO	11
2.4 ESTUDOS DE CASOS	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 ELETORRESISTIVIDADE	18
3.1.1 Interpretação da Sondagem Elétrica Vertical.....	20
3.1.2. Interpretação das SEV's – Análise Morfológica.....	21
3.1.3 Análise quantitativa das SEV's.....	22
3.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE SOLOS E ROCHAS	23
3.3 EQUIPAMENTO – SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL (SEV)	25
3.4 RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) - Ground Penetrating Radar	26
3.5 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS	27
3.6 AQUISIÇÃO COM GPR	35
3.6.1 Sondagens de Velocidade CMP	36

3.6.2 Caminhamento com Afastamento Constante	38
3.7 PROCESSAMENTO E APRESENTAÇÃO DOS DADOS	39
3.8 EQUIPAMENTOS - RADAR DE PENETRAÇÃO	
DO SOLO (GPR)	40
3.9 NIVELAMENTO	42
3.9.1 A Topografia do Terreno	42
3.9.2 Características Técnicas do Nível Óptico	42
3.9.3 Princípios do Nivelamento	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL	45
4.1.1 Resultados e Análise Morfológica	46
4.1.2 Modelos Geoelétricos Quantitativos	47
4.2 NIVELAMENTO	57
4.3 RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR)	58
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
6.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS	77
7. ANEXO 1 - Planilhas de Campo das SEV1, SEV2, SEV3,	
SEV4 e SEV5	86
7.1 ANEXO 2 - Tabela de Nivelamento da área de estudo	
na Fazenda Jurity	91

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Mapa de Localização e vias de acesso da área de estudo, Município de Dom Aquino – MT Fonte: Extraído e Modificado de http://www.aondefica.com/mapamatogrossod.asp acessado em 05/12/2004	4
FIGURA 02 - Mapa Geológico da micro-bacia e seu entorno (GONÇALVES, 2003).	6
FIGURA 03 - Mapa Pedológico da micro-bacia e seu entorno (GONÇALVES, 2003)	9
FIGURA 04 - Ilustração do Horizonte 2, observado em trincheira	12
FIGURA 05 - Toposseqüência Jurity, realizada na vertente da margem direita do Córrego Chico Nunes (GONÇALVES, 2003).....	14
FIGURA 06 - Configuração de arranjos eletródico da técnica da Sondagem Elétrica Vertical, utilizando o arranjo Schlumberger. (BORGES, 2002)	19
FIGURA 07 - Morfologia de algumas seções geoeletricas (BRAGA 2002) ...	22
FIGURA 08 - Resistivímetro Syscal R2- Íris. À esquerda o conversor de corrente e à direita o console principal.	26
FIGURA 09 - Diagrama de um par de antenas bi estática (Borges 2002)	27
FIGURA 10 - Propagação da onda eletromagnética	28
FIGURA 11 - Movimentação de cargas associada à corrente de condução (ANNAN, 1992)	29
FIGURA 12 - Movimentação de cargas associada à corrente de Deslocamento (ANNAN, 1992).....	30

- FIGURA 13** - Sondagem de velocidade do tipo CMP. À esquerda a antena transmissora e à direita a antena receptora. Os números acima indicam a posição seqüencial das antenas durante a aquisição. As linhas vermelhas indicam o caminho das ondas aéreas. As linhas azuis indicam o caminho das ondas diretas no solo. As linhas pretas representam o percurso das ondas refletidas no ponto comum (Modificado de BORGES, 2002)..... 36
- FIGURA 14** - Gráfico idealizado do tempo de viagem das diferentes ondas de radar em função da distância (x) de separação das antenas numa sondagem do tipo CMP (PORSANI 1999)..... 37
- FIGURA 15** - Esquema de aquisição com GPR, no modo caminhamento, passo a passo (p), com afastamento constante. a) Procedimento envolvendo movimentos repetitivos das antenas transmissora e receptora, com espaçamento constante (a) entre as antenas; b) oito traços esquemáticos de GPR mostrando a chegada da onda aérea, da onda direta na terra e da onda refletida no substrato em subsuperfície (modificado de BORGES, 2002)..... 38
- FIGURA 16** - Esquema do sistema do GPR, com as seis partes básicas: duas antenas, transmissora e receptora, controle central e microcomputador 40
- FIGURA 17** - Conjunto RAMAC/GPR. A) computador portátil. B) unidade de controle central. C) antenas transmissora e receptora de 50 MHz e 100 MHz; D) hastes de transporte das antenas. E) separador das antenas..... 41
- FIGURA 18** - Equipamento utilizado para realização do nivelamento do terreno. A) – Nível óptico; B) – Régua de Visada; C) - Trena; e D) – Tripé..... 42
- FIGURA 19** - Esquema de para determinar o desnível altitude ΔH entre os pontos A e B..... 43

- FIGURA 20** - Vista da vertente onde foram realizados os ensaios geofísicos. Em primeiro plano aparece o piezômetro que indica o início da linha de GPR cuja direção é a borda direita das árvores no topo da vertente. A SEV 1 (bandeira branca na foto) foi realizada a 10 m do piezômetro 44
- FIGURA 21** - Localização das SEVs realizadas. As SEVs estão espaçadas de 100 em 100 m..... 45
- FIGURA 22** - Curva de Resistividade Aparente em função da abertura AB/2 das cinco SEVs..... 46
- FIGURA 23** - Gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente da SEV1 (círculos pretos) em função da meia-abertura AB/2 dos eletrodos de corrente, e curva da resistividade aparente calculada (linha vermelha) a partir do modelo (ajustado pelo programa IPI2win) para camadas horizontais (linha azul)..... 47
- FIGURA 24** - Perfil de solo no furo de sondagem a trado ST4, 10 m acima da posição da SEV1 e ST5, 45 m acima da SEV1. A escala vertical está em metros. (Modificado de GONÇALVES, 2003) 48
- FIGURA 25** - Gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente da SEV2 (círculos pretos) em função da meia-abertura AB/2 dos eletrodos de corrente, e curva da resistividade aparente calculada (linha vermelha) a partir do modelo (ajustado pelo programa IPI2win) para camadas horizontais (linha azul)..... 49
- FIGURA 26** - Perfil de solo no furo e sondagem a trado ST6, 20m antes da SEV2 e ST7 está a 20m depois da SEV2. A escala vertical está em metros (Modificado de GONÇALVES, 2003)..... 50
- FIGURA 27** - Gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente da SEV3 (círculos pretos) em função da meia-abertura AB/2 dos eletrodos de corrente, e curva da resistividade aparente calculada (linha vermelha) a partir do modelo ajustado pelo programa IPI2win, para camadas horizontais (linha azul)..... 51

- FIGURA 28** - Perfil de solo no furo de sondagem a trado ST8, esta a 15m abaixo da SEV3. A escala vertical está em metros (Modificado de GONÇALVES, 2003) 51
- FIGURA 29** - Gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente da SEV4 (círculos pretos) em função da meia-abertura AB/2 dos eletrodos de corrente, e curva da resistividade aparente calculada (linha vermelha) a partir do modelo (ajustado pelo programa IPI2win) para camadas horizontais (linha azul) 53
- FIGURA 30** - Gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente da SEV5 (círculos pretos) em função da meia-abertura AB/2 dos eletrodos de corrente, e curva da resistividade aparente calculada (linha vermelha) a partir do modelo (ajustado pelo programa IPI2win) para camadas horizontais (linha azul) 54
- FIGURA 31** - Perfil de solo no furo de sondagem a trado ST10, 5m antes da SEV5. A escala vertical está em metros (Modificado de GONÇALVES, 2003) 55
- FIGURA 32** - Gráfico da curva de nível da vertente do Córrego Chico Nunes 57
- FIGURA 33** - Localização das duas linhas de GPR realizadas ao longo da vertente, com antenas de 50MHz (linha contínua fina) e 200MHz (linha contínua grossa). A linha de CMP foi adquirida paralelamente ao Córrego Chico Nunes, na base da vertente 58
- FIGURA 34** - Linha de GPR no início da vertente com antenas de 200 MHz. (Foto à esquerda). Antenas no rebocador de fibra de vidro (foto à direita) 59
- FIGURA 35** - Visualização em *Linescan* do perfil de GPR do tipo CMP (Common Mid Point), com antenas de 50MHz 60

- FIGURA 36** - Visualização do diagrama de velocidades resultante da análise de *Semblance* do perfil CMP (Common Mid Point) da Figura 35, com antenas de 50MHz..... 61
- FIGURA 37** - Visualização *Linescan* do perfil de GPR, com antenas de 50MHz,. com a escala vertical em profundidade..... 62
- FIGURA 38** - Visualização *Linescan* do perfil de GPR, com Antenas de 200MHz. com a escala vertical em profundidade..... 62
- FIGURA 39** - Perfil de GPR, com Antenas de 50MHz. à direita o perfil interpretado. A linha em azul (NA) indica o topo do lençol freático. A linha marrom delimita o topo e a base da Formação Cachoeirinha. O retângulo L2 corresponde ao local do perfil de GPR com antenas de 200 MHz 64
- FIGURA 40** - Perfil de GPR, com Antenas de 200MHz. Abaixo o perfil interpretado 66
- FIGURA 41** - Integração das SEV1 e SEV2 com o Perfil de GPR, com antenas de 50MHz. As localizações das Sondagens a Trado (ST) e a localização do perfil de GPR com antenas de 200 MHz..... 67
- FIGURA 42** - Estrutura Geoelétrica da vertente a partir dos modelos de camadas das cinco SEVs 68

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Relações de profundidade de investigação versus configuração eletródica para arranjo Schlumberger. AB = separação entre os eletrodos de emissão de corrente elétrica 21
- Tabela 2** - Valores de resistividades elétricas nos solos e rochas comuns na área de estudo. Fonte: * REYNOLDS (1997), § BRAGA (2002), § FIGUEIRÓLA (1974), & SHARMA (1997), £ ORELLANA (1972), ¢ TELFORD et al. (1990), n ABNT-NBR 7117 (1981)..... 25
- Tabela 3** - Materiais geológicos comuns com sua constante dielétrica (ϵ_r'), condutividade elétrica (σ_0), velocidade (v) e atenuação (α) observados nas frequências utilizadas no GPR (Porsani, 1999). 33
- Tabela 4** - Coeficiente de reflexão para quatro tipos de situações diferentes PORSANI (1999)..... 34
- Tabela 5** - Frequências centrais das antenas versus profundidade máxima de penetração (MALA GEOSCIENCE, 1977). 35
- Tabela 6** - Resistividade e espessura das unidades geoeletricas encontradas após os modelamentos das curvas das SEV's 55

LISTA DE SIMBOLOS

α	coeficiente de atenuação (em dB/m)
B	vetor indução magnética em Weber/metro quadrado (W/m^2).
D	densidade de corrente de deslocamento em Coulomb/metro
dB	decibel.
ϵ	permissividade dielétrica
ϵ_r	constante dielétrica
E	intensidade do campo elétrico em volts/metro (V/m)
f	freqüência
GHz	Gigahertz (10^9 Hz)
MHz	Megahertz (10^6 Hz)
H	Intensidade do campo magnético
i	número complexo ($i = \sqrt{-1}$)
j	densidade de corrente de condução em A/m^2 ampère/metro quadrado
K	número de onda
λ	comprimento de onda (m)
μ	permeabilidade magnética em Henry/metro (H/m)
mS	milisiemens (10^{-3} Siemens, unidade de σ)
ns	nanosegundo (10^{-9} segundos)
ρ	resistividade elétrica
σ	condutividade elétrica
v	velocidade
AQ	Areia Quartzosa
LE	Latossolo Vermelho Escuro
LR	Latossolo Roxo
LVA	Latossolo Vermelho Amarelo
TQDL	Dentrito-Laterita do Terciário-Quaternario

LISTA DE ABREVIATURAS

AMPA	- Associação Matogrossense dos Produtores de Algodão.
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente.
FEMA	- Fundação Estadual de Meio Ambiente.
FACUAL	- Fundo Apoio a Cultura do Algodão.
IBAMA	- Instituto Brasileiro de Recursos Renováveis.
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
ICET	- Instituto de Ciências Exatas e da Terra.
CONAB	- Companhia Nacional de Abastecimento
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAMATO	- Federação da Agricultura e Pecuária do Estado de Mato Grosso
FAMEV	- Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária
LARB	- Laboratório de Análise de Resíduos de Biocidas
UNICOTON	- União Nacional de Cotonicultores em Primavera do Leste.
CMP	- <i>Common Mid Point</i> – Ponto médio comum
GPR	- <i>Ground Penetrating Radar</i> – Radar de Penetração do Solo

RESUMO

PEREIRA, M. J. *Geofísica aplicada para a caracterização da cobertura pedológica de uma vertente na Região de Dom Aquino-MT*. Cuiabá, 2005. 95p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso.

Esta pesquisa, realizada na micro-bacia do córrego Chico Nunes, afluente do Rio das Mortes, município de Dom Aquino (MT), teve como principal objetivo a aplicação dos métodos geofísicos de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Radar de Penetração do Solo (GPR) e a comparação com os dados obtidos por observação direta, subsidiando os modelamentos da cobertura pedológica e do funcionamento hídrico de uma vertente representativa desta micro bacia. Foram realizadas cinco SEV's com abertura máxima de $AB/2$ de 100 m, em pontos espaçados de 100 m ao longo da vertente e dois perfis de GPR, um com antenas de 200 MHz e outro com antenas de 50 MHz. As SEV's e os perfis de GPR permitiram estimar as espessuras das diferentes camadas de solo, da rocha alterada e da rocha sã. Estes dados, associados com informações pedológicas obtidas em furos de sondagens e trincheiras, tais como os diferentes horizontes de solo e o nível freático, permitiram integrar os dois métodos geofísicos com as informações do subsolo e obter uma imagem da seção vertical da vertente. Estes resultados mostraram-se coerentes e similares aos obtidos de forma direta, por procedimentos clássicos utilizado na pedologia, incluindo trincheiras e sondagens a trado, que no geral exigem exaustivos levantamentos de campo. Permitiram também obter informações em profundidades maiores do que 20 m e obter a continuidade das camadas ao longo da vertente.

Palavras-chave: GPR – Radar de Penetração no Solo, SEV – Sondagem Elétrica Vertical, Topossequência, Tipos de solos e Comportamento Hídrico do Solo.

ABSTRACT

The main objective of this research, carried out in the micro-basin of the stream Chico Nunes, tributary of Rio das Mortes, in the municipality of Dom Aquino (MT), was to evaluate the application of the geophysical method of the electroresistivity and Ground Penetrating Radar (GPR) to compare the data obtained by direct observation. These geophysical methods allowed the modeling of the pedological covering and the hydrologic functioning of a selected slope, representative of the areas of agricultural production in the study region. Five Vertical Electric Sounding (VES) with AB/2 maximum opening of 100m, starting at the lower end of the slope and going upward every 100 m, were applied. At the same slope, two GPR profiles, with 200 MHz and 50 MHz antennas, were also applied. The VES and the GPR profiles allowed estimating the thickness of the different soil layers, of the altered rock and of the unchanged rock. These data, associated to pedological information obtained from boreholes produced by manual drill sounding and trenches, such as the different soil horizons and water table level, allowed the integration of the two geophysical methods with the subsoil information and the production of an image of the slope vertical section. These results showed coherence and similarity to that ones obtained directly by classical procedures used in pedology, which included trenches and soundings by drill, that demand, in general, exhausting surveys in field. Information of depths higher than 20 m and the continuity of the layers throughout the slope were also obtained.

Key-words: Ground Penetrating Radar, Vertical Electric Sounding, toposequence, soil types, hydrologic soil functioning.

1. INTRODUÇÃO

A formação sócio-econômico e cultural do Estado de Mato Grosso tem sua origem primordial no final do segundo decênio do século XVIII. Através do movimento das bandeiras, procedente da cidade de São Paulo, surgiu o povoado do Senhor Bom Jesus de Cuiabá, nas lavras do bandeirante Miguel Sutil. A abundância do ouro e a alta acessibilidade aflorante fixaram o povoado de desbravadores do leste brasileiro, despertando interesse da própria coroa portuguesa. Após a febre do ouro e pelas dificuldades surgidas na exploração de novas jazidas, aos poucos a ocupação do Estado foi se viabilizando pela exploração/produção silvo-pastoril.

Atualmente, o Estado de Mato Grosso se destaca, a nível nacional, na produção agropecuária, e novas opções econômicas estão sendo implantadas e em franco desenvolvimento como a indústria, os agros-negócios e o setor de serviços.

Mato Grosso abriga três importantes ecossistemas: o cerrado, o pantanal e a floresta amazônica, inseridos nas duas mais importantes bacias hidrográficas da América do Sul, a Amazônica (Rios Juruena, Teles Pires, Xingu, Araguaia, etc) e a Platina onde o Rio Paraguai é o seu principal formador, despertando à necessidade dos cuidados com sustentabilidade desses ambientes.

A agricultura, a pecuária e a indústria extrativa de madeiras, fizeram o Estado se destacar no cenário nacional. Com tecnologia, capacidade técnica e gerencial, a produção e a produtividade colocaram o Estado em um patamar importante para o País.

Entretanto, como toda a medalha tem duas faces e em um mundo contemporâneo, que à medida que há um aumento populacional necessita de energias vitais, a preservação da natureza fica ameaçada e faz-se necessária a geração de mecanismos culturais e fiscalizadores voltados à conservação do ambiente. Neste contexto a água e o solo despontam como as grandes preocupações deste século e precisam ser cuidadas com interesse maior.

Entre os produtos agrícolas cultivados em Mato Grosso, a cultura do algodão se destaca. A cada nova safra, aumenta-se a produção e em conseqüência, um aumento na quantidade de pesticidas aplicados no combate a antigas e novas pragas e doenças, que podem ser carreados para cursos de água e represas e dentre as

conseqüências indesejáveis do uso das mesmas, podem ser citadas a presença de resíduos no solo, água e ar, nos tecidos vegetais e animais e, como decorrência destruição de microorganismo do solo, efeitos prejudiciais sobre organismos não alvos, mortalidade de insetos benéficos à natureza e presença de resíduos em alimentos, além da contaminação ocupacional (DORES, 2000).

Segundo FAY *et al.* (1997) o uso de pesticidas na agricultura deverá continuar nas próximas décadas a desempenhar importante papel na produção de alimentos. No entanto, deve-se considerar que o uso desses compostos por períodos prolongados pode representar uma ameaça à estrutura do solo, com diminuição de matéria orgânica, podendo levar esses compostos a contaminar água, solo e ar, entre outros componentes do ecossistema. Pelo escoamento superficial das águas de chuva, os pesticidas podem, de maneira direta, atingir os cursos d'água, contaminando-os, ou, de maneira indireta, pela erosão e transporte de sedimentos contaminados até o fundo dos vales. Além do escoamento superficial, as águas pluviais podem se infiltrar no solo e escoarem-se sub-superficialmente em direção ao lençol freático podendo contaminá-lo (ARIZAGO, 2000). Esse entendimento exige estudos voltados ao comportamento físico-hídrico do solo envolvendo a caracterização de certos parâmetros, destacando-se a textura, estrutura e porosidade do solo que se relacionam não somente ao funcionamento hídrico, mas também a outras propriedades, tais como, a química e biologia do solo.

SALOMÃO (1994) estudou a influência das características do solo no seu funcionamento hídrico tendo em vista a dinâmica erosiva, estabelecendo metodologia que permite deduzir as tendências do escoamento superficial e subterrâneo das águas de chuva ao longo de vertentes. A caracterização da cobertura pedológica é realizada por meio do levantamento de toposseqüência realizada em vertente representativa. Segundo GONÇALVES (2003), sua aplicação exige levantamentos intensivos de campo, de maneira a caracterizar a cobertura pedológica, isto é, sucessão de solos e respectivos horizontes pedológicos que compõem uma vertente. Exige, portanto, a determinação da distribuição lateral e vertical dos diferentes horizontes pedológicos numa vertente. Esses levantamentos realizam-se pela execução de tradagens e trincheiras voltadas à descrição das características morfológicas do solo, incluindo-se, em especial, aquelas relacionadas

às características físico-hídricas, para posterior representação em topossequência, isto é, seções longitudinais da vertente, representando-a topograficamente e em relação à conformação e características morfológicas dos diferentes horizontes pedológicos, e em relação à conformação do lençol freático alcançado pelas tradagens.

Segundo DORES (2000), o conhecimento da posição do lençol freático ao longo de toda a vertente é fator preponderante para a interpretação do funcionamento hídrico e para a determinação dos riscos de contaminação das águas superficiais e subterrâneas por pesticidas. Esse conhecimento é dificultado pelas limitações impostas pelas investigações em sub-superfície por meio de tradagem, que se dificultam ao atingir profundidades superiores a 5 metros, e ao encontrar camadas duras ou de materiais granulares. Nesses casos, a conformação do lençol freático por investigação direta exigiria sondagens mecânicas a percussão e rotativa, altamente dispendiosas.

Os métodos geofísicos voltados à investigação indireta dos terrenos em subsuperfície têm sido tradicionalmente aplicados com sucesso, e cada vez mais aperfeiçoados com o avanço do conhecimento científico, especialmente da Física, dos materiais, e dos instrumentos de precisão. As investigações da profundidade de aquíferos subterrâneos e de topos rochosos vêm sendo realizadas pela geofísica com baixo custo e com tempo relativamente curto.

A área de estudo localiza-se na margem direita da micro bacia do Córrego Chico Nunes, afluente do Rio das Mortes, situa-se na Fazenda Jurity, com área total de 476,337 ha, pertencente ao Município de Dom Aquino – MT. Está a 195 km de distância da capital Cuiabá, 48 km da cidade de Primavera do Leste, 70 km da cidade de Campo Verde e a 65 km de Dom Aquino-MT, como mostra a (Figura 1).

O principal objetivo deste trabalho é a aplicação dos métodos geofísicos: Eletrorrestividade e Radar de Penetração no Solo (GPR) ao longo de uma vertente representativa, tendo em vista subsidiar a caracterização da cobertura pedológica e respectivo funcionamento hídrico. Os objetivos específicos são:

- Modelar as camadas eletrorrestivas a partir das SEVs, determinando as espessuras das diferentes camadas de solo/rocha e a profundidade do lençol freático;

- Obter uma imagem da subsuperfície ao longo da vertente com GPR, determinando a continuidade das camadas de solo/rocha ao longo da vertente;
- Integrar o modelo geoeletrico das SEVs, com as imagens obtidas no GPR, elaborando o modelo geofísico integrado da topossequência.

Essa micro bacia foi escolhida por se identificar com os componentes solos e relevo comumente encontrado em regiões de produção agrícola intensiva do Estado de Mato Grosso, e por ter sido objeto de estudos da cobertura pedológica por meio de topossequência, permitindo, dessa forma, comparar os resultados obtidos com a interpretação geofísica.

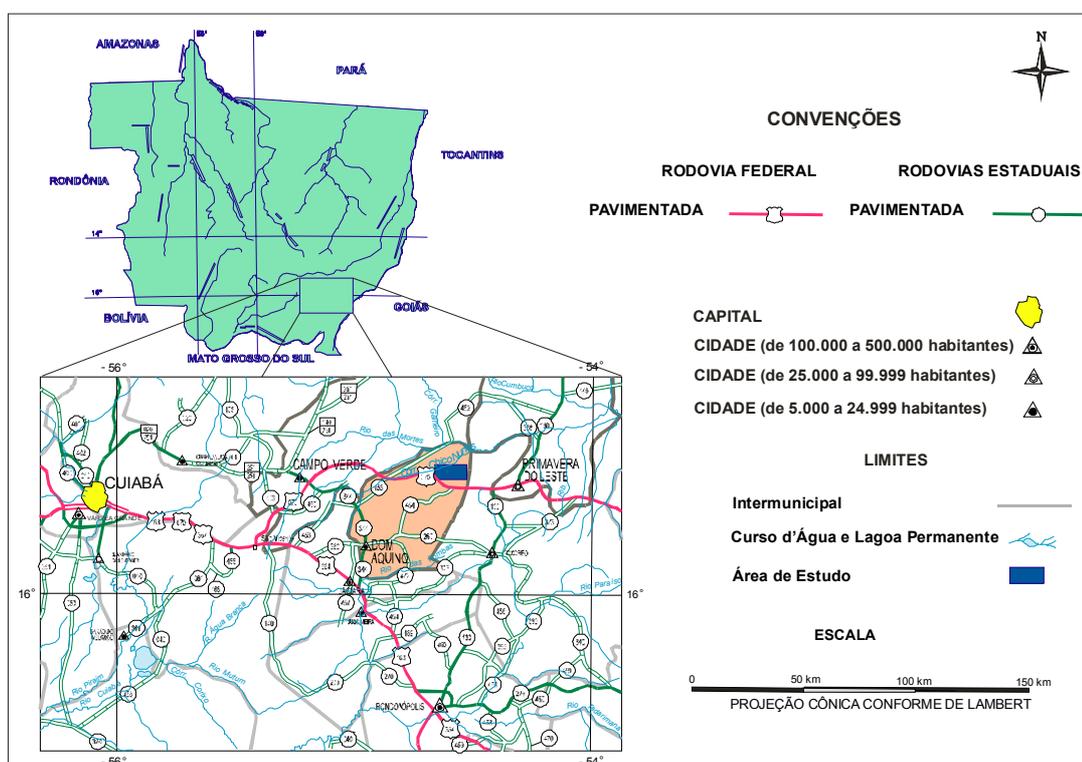


Figura 1 - Mapa de Localização e vias de acesso da área de estudo, Município de Dom Aquino – MT.

Fonte: Extraído e Modificado de <http://www.aondefica.com/mapamatogrossod.asp> acessado em 05/12/2004.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados dados de interesse relativos à área objeto, e síntese de pesquisas envolvendo a utilização de métodos geofísicos na caracterização da cobertura pedológica.

2.1. Aspectos Geológicos, Geomorfológicos e Pedológicos da Área Objeto.

A geologia (Figura 2) mostra que a região estudada situa-se na porção extremo NW da Bacia do Paraná é constituído pelas rochas da Formação Aquidauana, do Grupo Bauru e encobertos por sedimentos dos depósitos detrítico-lateríticos do Terciário, Formação Cachoeirinha. Junto às drenagens atuais ocorrem pacotes de sedimentos areno-cascalhosos e aluviões recentes, do Quaternário, equivalentes a formação Pantanal. O tipo litológico que constitui o embasamento regional é a Formação Aquidauana, caracterizado por arenitos grossos a finos, conglomeráticos, por vezes argilosos ou micáceos. Essas rochas ocorrem em bancos maciços ou não, são intercalados ciclicamente por lentes de arenitos microconglomeráticos, arenitos argilosos e argilitos, com concreções e cimento de óxidos de ferro e manganês, que predominam em direção ao topo (BARROS *et al.* 1982).

O Grupo Bauru nas escarpas a sul da área estudada é representado pela Formação Cambambe, topo desta unidade litoestratigráfica é caracterizada por arenitos argilosos microconglomeráticos a conglomeráticos, interdigitada por lentes de conglomerados, brechas intraformacionais, arenitos fino a médio e silcretos. (WESKA *et al.* 1993).

A Formação Cachoeirinha na MT-130, trevo de acesso a Poxoréu, é caracterizada por pacotes areno-cascalhosos, intensamente cimentados por óxidos de ferro, com alterações nas cores vermelha e amarela, cíclica, e os clastos em tons predominantemente de óxidos de ferro e amarela (WESKA *et al.* 1993).

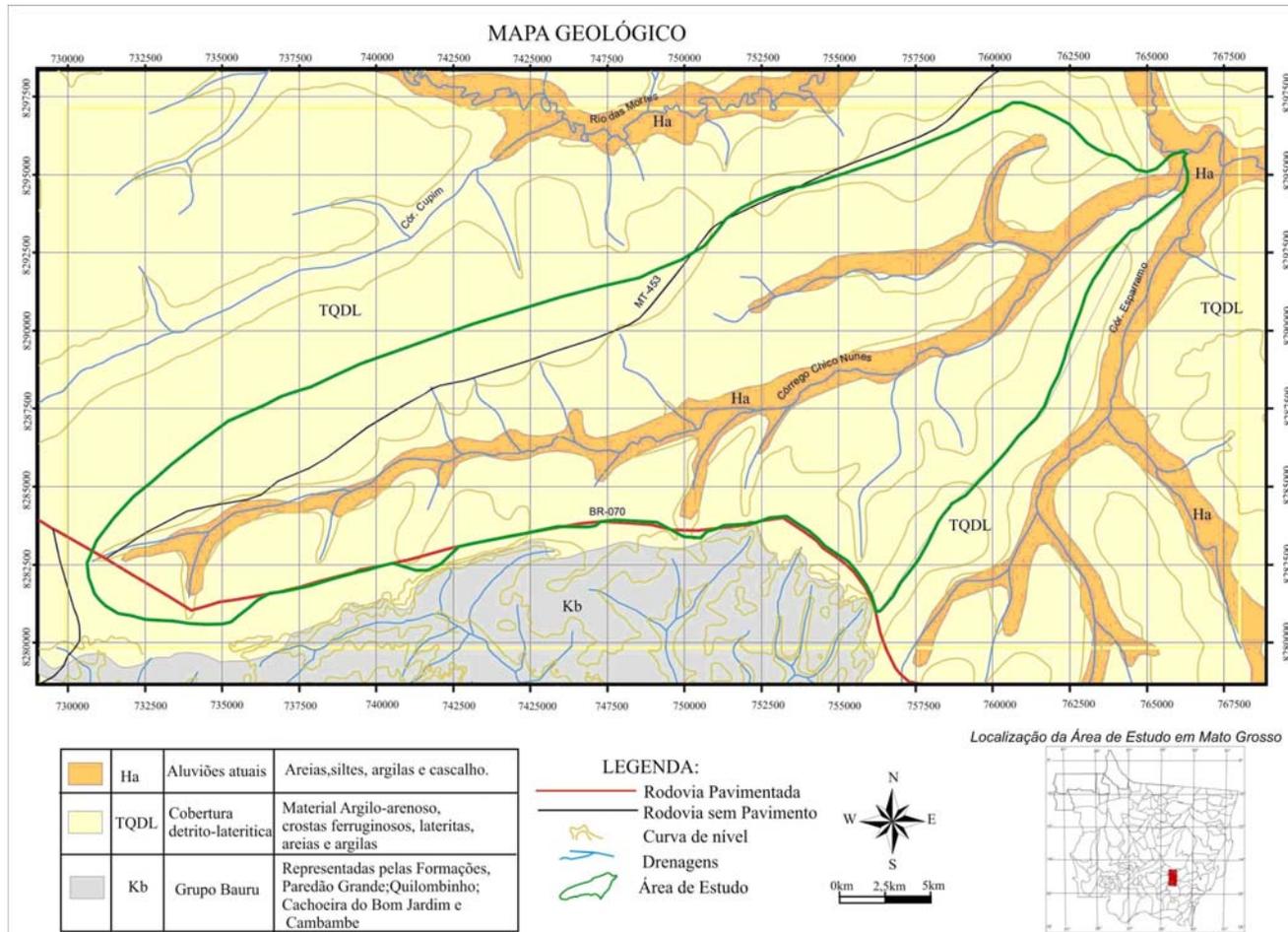


Figura 2 – Mapa Geológico da micro bacia e seu entorno (GONÇALVES, 2003).

Os depósitos sedimentares mais recentes encontram-se ainda em fase de deposição nas planícies e canais dos grandes rios e afluentes, e são compostos de areia, silte, argila e cascalho.

Em termos geomorfológicos a região em estudo situa-se na unidade denominada Planalto dos Guimarães, que segundo ROSS & SANTOS (1982), apresenta três sub-unidades com características topográficas e morfológicas distintas, denominadas de planaltos: dos Alcantilados, do Casca e da Chapada dos Guimarães, neste último onde se insere a área. As cotas variam de 600 a 800 m em relação ao nível do mar, predominando superfícies ligeiramente aplainadas e colinas amplas, contornadas por escarpas.

O Rio das Mortes nasce e se desenvolve em superfícies suavizadas. Nas porções de cabeceiras, as cotas topográficas, variam entre 800 a 600 m. Ao longo da área de influência da BR 070, ou quando esta intercepta esse rio, as cotas variam entre 720 a 650m. Neste planalto, a densidade de drenagem é fraca e isto se deve aos tipos pedológicos e litológicos predominantes que permitem a rápida absorção.

Na área objeto quatro tipos pedológicos são encontrados: Latossolo Vermelho Amarelo, Gleí Humico, Solos Concrecionários e Areia Quartzosa dominando as vertentes, ocorrentes no terço inferior das vertentes. A figura 3 ilustra o mapa pedológico da área de estudo, onde foram identificados vários tipos de solo.

Os Latossolos são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresentar mais que 150 cm de espessura. São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material de origem, são virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo. São solos normalmente muito profundos, com seqüência de horizontes A, B, C, com pouca diferenciação entre eles, e transições usualmente difusas. De uma forma geral, os teores de argila aumentam gradativamente com a profundidade, ou permanecem constantes ao longo do perfil. São solos fortemente ácidos, típicos de regiões equatoriais e tropicais, ocorrendo

também em zonas subtropicais, distribuídos, sobretudo, por amplas e antigas superfícies de erosão.

Gleissolos são solos hidromórficos, constituídos por material mineral, que apresentam horizonte glei dentro dos primeiros 50 cm da superfície do solo, ou a profundidade entre 50 e 125 cm, desde que imediatamente abaixo do horizonte A ou E, ou precedidos por horizonte B incipiente, B textural ou C com presença de mosqueados abundantes (malhas escuras) com cores de redução. Esses tipos de solos são permanentes ou periodicamente saturados por água, salvo se artificialmente drenados. Caracterizam-se pela forte gleização em decorrência do regime de umidade redutor, que se processa em meio anaeróbico, com muita deficiência ou mesmo ausência de oxigênio, devido ao encharcamento do solo por longo período ou durante todo o ano. O processo de gleização implica na manifestação de cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, devido a compostos ferrosos resultantes da escassez de oxigênio, causado pelo encharcamento. Provoca, também, a redução e solubilização de ferro, promovendo translocação e reprecipitação dos seus compostos. São solos que ocasionalmente podem ter textura arenosa somente nos horizontes superficiais, desde que seguidos de horizonte glei de textura franco arenosa.

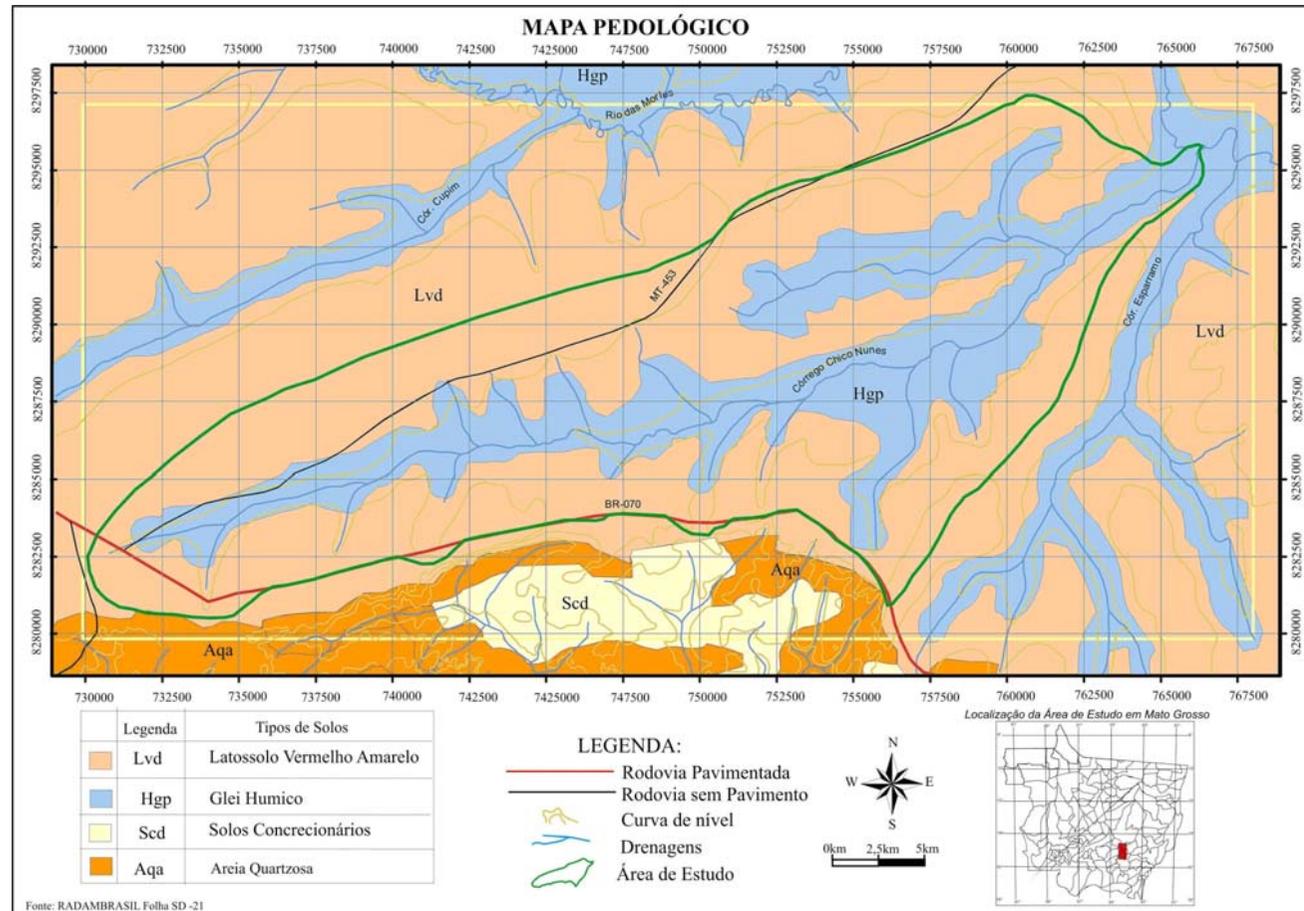


Figura 3- Mapa Pedológico da micro-bacia e seu entorno (GONÇALVES, 2003).

2.2. CLIMA E VEGETAÇÃO

Segundo o PRODEAGRO (1997), a região estudada apresenta clima tropical continental alternadamente úmido e seco no decorrer do ano. Além do fator continentalidade é muito importante o controle climático exercido pelo relevo e a altitude, no caso sendo os maiores responsáveis pela diversidade climática no Estado de Mato Grosso. A região do Planalto dos Guimarães apresenta como característica fundamental com temperatura relativamente baixa, condicionada pelo alto topográfico, cujo caráter mesotérmicos e traduz no traço mais importante. Com a redução do calor, há diminuição das taxas de evapotranspiração, atestado por registrar valores menores de deficiência hídrica anual, oscilando entre 100 e 200 mm.

Segundo DORES (2000), no ano de 1997 em Primavera do Leste, as chuvas mais intensas ocorreram nos meses de abril a novembro coincidindo com a safra das principais lavouras, e por conseqüência, também com a época de aplicação de pesticidas.

Na área são encontradas duas formações vegetais: cerrados e matas ciliares. O cerrado é constituído de arvoretas relativamente baixas, com troncos e galhos retorcidos, disseminados entre numerosas e variadas plantas lenhosas anãs e herbáceas, com predomínio da espécie denominada localmente como Lixeira.

As matas ciliares ocorrem nas margens dos cursos d'água geralmente associadas às planícies aluvionais (áreas de várzea), onde as deposições quaternárias se renovam constantemente. Observa-se também a presença de formações pioneiras de influência fluvial, subdivididas em Arbustivas e Herbáceas.

Áreas antropizadas predominam na região objeto correspondendo às áreas de atividades agrícolas, culturas cíclicas e atividades agropecuárias.

2.3. CARACTERIZAÇÃO MORFOPEDOLÓGICA DA ÁREA OBJETO.

A micro-bacia do Córrego Chico Nunes, é representada por uma forma de relevos predominantes, caracterizado por Colinas Amplas, apresentando interflúvio extenso e aplainado, com leve caimento em direção ao fundo de vale.

A Topossequência representada pela Figura 5 caracteriza a cobertura pedológica existente ao longo de toda a vertente disposta na margem direita do córrego Chico Nunes, desde o seu topo, em parte do interflúvio, até o fundo de vale, próximo ao leito do córrego.

O perfil da vertente tem forma retilínea à ligeiramente convexa, com a amplitude de 33 metros, e declividade do terço superior em torno de 4,5 %, do terço médio de 5% e do terço inferior de 9%.

A cobertura pedológica é dominada por Latossolo Vermelho Amarelo, que ocupa praticamente toda a vertente; somente em sua porção terminal, junto ao fundo do vale pode-se observar a passagem para o Plintossolo e deste para Gleissolo, que se encontram bem individualizados.

A Figura 5 ilustra a Topossequência, onde foram identificados 7 horizontes pedológicos:

HORIZONTE 1: Corresponde ao horizonte O (orgânico) que recobre a porção final da vertente (base da vertente); caracteriza por apresentar coloração preta, de textura argilosa a argilo-arenoso; sua estrutura é prismática, moderada muito pequena, com poucos poros; possui transição clara e plana, é muito friável, plástico e ligeiramente pegajoso, presença de muitas raízes finas.

HORIZONTE 2: Corresponde a um horizonte de transição entre o horizonte superior (horizonte O) e o Horizonte C, e está situado abaixo do horizonte 1; tem a coloração marrom cinza escuro, argilo-arenoso, estrutura prismática, presença de poucos a raros poros, transição clara e plana; é muito friável, plástico e ligeiramente pegajoso, presença de poucas e finas raízes.

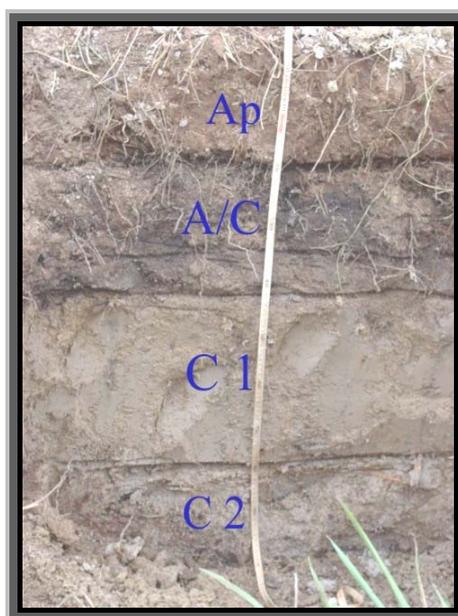


Figura 4 - Ilustração do horizonte 2, observado em trincheira.

HORIZONTE 3: Corresponde ao horizonte C com presença de plintitas* ou (óxido de ferro) situado abaixo do horizonte 2 no pé da vertente, e a montante, abaixo do horizonte 7. É espesso, na totalidade de sua ocorrência, não tendo sido ultrapassado com tradagem de até 5 metros. Caracteriza-se por apresentar coloração vermelha amarelada, e as plintitas vermelho, textura argilosa; a quantidade de plintita aumenta à medida que aumenta a profundidade; em alguns pontos de tradagem encontrou-se presença de concreções (OLIVEIRA *et al.* 1992).

HORIZONTE 4: Corresponde ao horizonte superficial (horizonte Ap) que recobre grande parte da vertente; sua espessura dificilmente ultrapassa os 30 cm. Caracteriza-se pela cor marrom escuro a marrom avermelhado escuro, de textura argilo-arenoso, sem estrutura, ou com estrutura granular fraca e pequena; presença de poros que variam de muitos a comum; a transição é clara e plana; são ligeiramente friáveis a muito friáveis, plástica, ligeiramente pegajoso, rara presença de raízes finas e médias.

* Plintitas: Mistura de óxidos de ferro e de alumínio, argila, quartzo e outros diluentes, constituindo material brando, e que se individualiza como manchas avermelhadas, usualmente distribuídos num padrão vesicular ou reticulado. A plintita tem capacidade de transformar-se irreversivelmente em petroplintina, quando sujeita a repetidos ciclos de umedecimento e secagem.

HORIZONTE 5: Corresponde ao horizonte de transição A/B, situado abaixo do horizonte 4 (horiz. Ap). Caracteriza por ser argilo-arenoso a areno-argiloso, e coloração marrom escuro, estrutura granular fraca e media, presença comum de poros, transição clara e plana, variando de ligeiramente friável a muito friável, ligeiramente plástica a plástica, rara presença de raízes (quando ocorrem são muito finas). Este horizonte encontra-se em geral ligeiramente compactado.

HORIZONTE 6: Correspondente ao horizonte Bw1. situado abaixo do horizonte de transição A/B. Caracteriza-se pela coloração vermelho amarelo, e, em profundidade passa a vermelho, textura argilo-arenoso a argiloso, possui uma estrutura granular, fraca e media, presença de poros comuns a muitos (abundancia), é muito friável, plástico e ligeiramente pegajosos, com raras raízes.

HORIZONTE 7 : Corresponde ao horizonte, Bw2, é diferenciada do Bw1 principalmente pela cor. Está situado abaixo do horizonte Bw1, é espesso, tendo sido ultrapassado por tradagem somente na base da vertente. É caracterizado por apresentar coloração vermelha; a vermelho amarelado, com o aumento da profundidade aumenta a presença de concreções e plintitas de coloração amarela. Sua estrutura ao longo do perfil é variada, pois apresenta de jusante para montante estrutura granular, grande e fraca, passando para uma estrutura granular media e fraca e mais a montante granular, fraca a maciça porosa (microagregada). Na porção de montante a consistência é friável, plástico e ligeiramente pegajoso, mas a jusante sua consistência é muito friável, muito plástico, ligeiramente pegajoso. Neste horizonte observam-se alguns agregados milimétricos de argila e raros grãos arredondados de quartzo.

Segundo (GONÇALVES, 2003), a caracterização da cobertura pedológica por meio da elaboração de toposseqüência Figura 5 permitiu deduzir o funcionamento hídrico da vertente representativa da micro-bacia do Córrego Chico Nunes. Simplificadamente pode-se afirmar que boa parte da vertente é ocupada por cobertura pedológica representada por Latossolo Vermelho Escuro no topo da vertente, Latossolo Vermelho Amarelo no Terço superior, e Latossolo Amarelo na porção e intermediário da vertente, onde se observa predominância da infiltração vertical das águas de chuva; a partir do terço inferior da vertente, quando ocorre à passagem do Latossolo Amarelo para Plintossolo, as águas de chuva tendem a escoamentos laterais, tanto superficiais como sub-superficialmente. Essa tendência ao escoamento lateral intensifica-se mais a

2.4. ESTUDOS DE CASOS

O método geofísico conhecido por Radar de Penetração no Solo – GPR – *Ground Penetrating Radar*, obteve nos últimos anos, substanciais avanços tecnológicos, com a publicação de inúmeros trabalhos, destacando-se os de DAVIS & ANNAN (1988), ANNAN *et al.* (1991), BERES & HAENI (1991), ANNAN & COSWAY (1992), HARARI (1996), PORSANI (1999), aplicados à investigação da água subterrânea.

Em investigações da cobertura pedológica para diferentes finalidades, o GPR tem sido utilizado isoladamente ou em conjunto com outros métodos geofísicos. Serão a seguir destacados alguns destes trabalhos estudando características do solo e da água subterrâneas:

- GRAZINOLI *et al.* (1996) → Caracterização de perfis de solos em áreas em declive no Rio de Janeiro.

- SCHRECK (1998). → Identificação e mapeamento de plumas contaminadoras de origem industrial.

- GANDOLFO (2000). → Avaliação de aplicações de GPR no Brasil, destacando as potencialidade e limitações a partir de casos estudados. Este artigo apresenta alguns exemplos de dados GPR adquiridos em diversos locais do nosso país e com os mais distintos objetivos de levantamento. Procura-se, através do relato destes casos (alguns bem sucedidos e outros nem tanto), levantar uma discussão a respeito da utilização desta metodologia nas mais diversas aplicações em geotecnia e meio ambiente dentro da nossa realidade.

- PORSANI & MALAGUTTI (2000). → Emprego do GPR para Estudos geológicos na Mineração Jundu, Descalvado-SP, para localizar interfaces geológicas abaixo da superfície da terra.

- AL HAGREY & MÜLLER (2000). → Investigação do índice de toxidade no Rio Salina, Califórnia, EUA.

- YODER *et al.* 2001. → Mapeamento em campos de agricultura com GPR e caminhamento eletromagnético induzido (EMI) para identificação de locais de alto potencial de movimento de água no solo. Através do EMI mapeou áreas de maior

saturação de água no solo e com o GPR detalhou os locais com os maiores fluxos de água no solo. Neste trabalho há uma revisão dos principais trabalhos com aplicação de GPR envolvendo: a) sua utilização para detalhar as características do solo que tinham originalmente sido caracterizadas com métodos convencionais; b) o mapeamento do “*Ortstein*” no solo, isto é, uma camada cimentada que é composta de materiais orgânicos transportados e silicato de alumínio e complexos de óxido de ferro que produz um a boa reflexão nos sinais de GPR; c) mapeamento do topo rochoso; d) Identificação da frente de saturação do solo e fluxos preferenciais da água no solo; e) mapeamento do solo sem destruir as discontinuidades texturais numa zona vadosa arenosa para guiar a colocação de amostradores de copos de sucção; f) Identificação da ocorrência de camadas do solo com concentração de poluentes oriundos de resíduos industriais; g) Caracterização do solo até o nível do lençol freático; h) Determinação precisa do conteúdo de água no solo; i) Comparação de valores medidos de conteúdo de água no solo obtidos com GPR com os obtidos com sonda de capacitância.

- BORGES & PORSANI (2001). → Utilizaram os métodos GPR e eletrorrestividade para caracterizar os sedimentos e o topo rochoso granito-gnáissico na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo.

- NAKASHIMA *et al.* (2001). → Determinação do nível de água subterrânea em áreas com reflexões múltiplas e ambíguas.

- STOFFREGEN *et al.* (2002). → Determinação do conteúdo solo/água: Comparando o GPR com dados do lisímetro.

- TRAVASSOS (2002). → Caracterização da subsuperfície rasa utilizando o método GPR.

- HUISMAN *et al.* (2003). → Desenvolvimento de um monitoramento temporal da variação espacial do conteúdo de água no solo, através da comparação do GPR com o TDR – Reflectometria no Domínio do Tempo.

- ARANHA *et al.* (2003). → Estudo geomorfológico de um *piping* em Gouveia, MG.

- NASCIMENTO, C. T. C. *et al.* (2003). → Variação sazonal da resistividade em latossolos.

- SHIRAIWA, MOURA, PORSANI (2003). → Investigação de estruturas pedológicas de uma vertente subsidiando o entendimento da dinâmica erosiva numa micro bacia do Rio Araguaia, GO.

- MOURA & VECCHIATO (2003) → Métodos Geofísicos Aplicados a Caracterização de Vertentes como Subsídio a Conservação Ambiental, visando o entendimento do funcionamento hídrico associado a processo erosivo linear

- PORSANI *et al.* (2004) → O uso do GPR e SEV no delineamento de contaminação num depósito de lixo: um estudo de caso no sudeste do Brasil.

- PORSANI, ELIS, & HIODO. (2005) → Investigações geofísicas para a caracterização de aquífero em fraturas de rochas em Itu, SP.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Vários são os métodos geofísicos que podem ser utilizados no estudo da cobertura pedológica. Alguns desses métodos fornecem dados sobre as condições dos materiais do subsolo, como espessura das camadas, nível d'água e profundidade do topo rochoso, e no caso de se possuir dados geológicos confiáveis para controle, até mesmo de informações sobre tipos de rochas existentes em profundidade, possibilitando o mapeamento das feições de solo/rocha.

Este capítulo tem como objetivo principal apresentar o material e os métodos utilizados nesta pesquisa. No desenvolvimento deste trabalho foram aplicados os métodos geofísicos da eletrorresistividade com a técnica de Sondagem Elétrica Vertical -SEV, utilizando o arranjo Schlumberger e Radar de Penetração no Solo – GPR (*Ground Penetrating Radar*).

3.1 Eletrorresistividade

A eletrorresistividade é um método geofísico que emprega corrente elétrica para identificar variações de resistividade elétrica no meio. A resistividade é designada por (ρ), dada em ohm. m e a condutividade (σ), dada em S/m, sendo a relação entre elas de

$$\rho = 1 / \sigma \quad (1)$$

Na eletrorresistividade existem 3 técnicas principais de aquisição de dados: a Sondagem Elétrica Vertical – SEV (utilizada para verificar a variação vertical de resistividade), o caminhamento elétrico (identificar variações laterais de resistividade), e perfilagem elétrica de poço (realizada dentro de poços/furos de sondagem para verificar a resistividade real de estratos geológicos).

A eletrorresistividade apresenta uma ampla gama de configurações de eletrodos, o que fornece ao método uma grande versatilidade. Um arranjo eletródico que é aplicado com sucesso na investigação de camadas sedimentares é o Schlumberger. Neste arranjo, a técnica da SEV consiste em injetar corrente

elétrica (I) no meio através de dois eletrodos (A e B) e medir a diferença de potencial resultante (ΔV) em dois outros pontos (M e N) entre os eletrodos de corrente (Figura 6). Deste modo, a resistividade aparente ρ_a do meio por onde circulam a corrente é dada pela razão entre a diferença de potencial (ΔV) e a corrente (I) vezes o fator geométrico K .

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad \text{e} \quad K = \frac{2\pi}{C} \quad (2)$$

Onde

$$C = \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right) \quad (3)$$

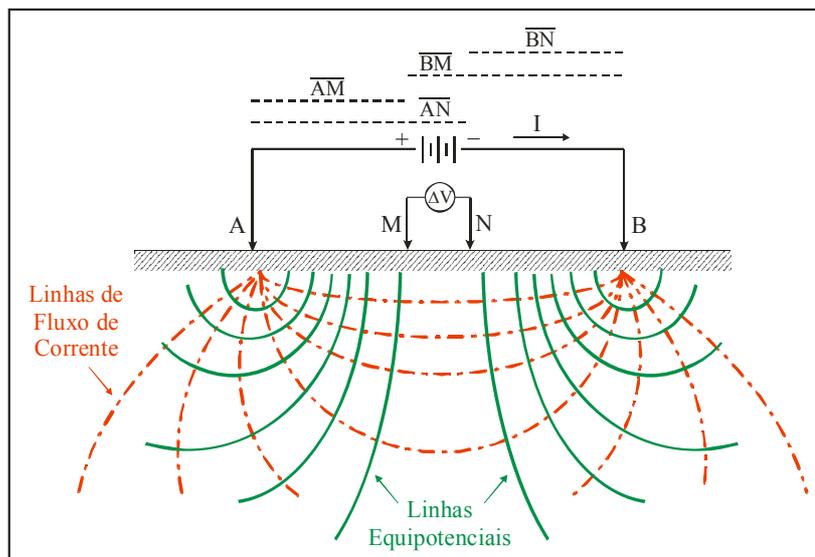


Figura 6 – Configuração de arranjo eletródico da técnica da Sondagem Elétrica Vertical, utilizando o arranjo Schlumberger (BORGES, 2002).

Os quatro eletrodos são dispostos em linha, com os eletrodos de potencial (MN) colocados entre os eletrodos de corrente (AB) e distribuídos simetricamente em relação ao ponto central. A distância MN deve ser bem menor que a distância $AB/2$ ($MN \leq AB/5$, TELFORD *et al.* (1990)). Na prática, quando o sinal ΔV medido torna-se muito fraco, aumenta-se a distância MN, isto é, adota-se um primeiro intervalo MN e realizam-se várias medidas com diferentes AB, depois aumenta-se MN que se conserva constante para outra série de deslocamentos de AB, sobrepondo-se dois ou três pontos da série anterior, evitando-se deslocar ao

mesmo tempo os eletrodos de corrente e de potencial, e mantendo a relação $MN \leq AB/5$. Esta manobra recebe a denominação de “embreagem” e permite uma checagem da qualidade dos dados obtidos durante o processo de campo.

A partir dos valores da resistividade aparente ρ_a calculada pela Equação (2) constrói-se um gráfico em escala bi-logarítmica da resistividade aparente em função de $AB/2$. Este gráfico é a base para interpretação qualitativa e quantitativa do ensaio. As variações nas medidas de resistividade aparente são interpretadas em função da estratificação geolétrica do meio investigado.

3.1.1 Interpretação da Sondagem Elétrica Vertical

A interpretação de uma SEV objetiva determinar a distribuição vertical dos estratos com diferentes resistividades no subsolo, partindo dos dados de resistividade aparente medidos na superfície. Em seguida são feitas as interpretações do significado geológico dos estratos com diferentes resistividades.

O ponto de sondagem é sempre localizado no centro geométrico do arranjo. A profundidade teórica de investigação (h) pode ser relacionada à distância entre os eletrodos de corrente AB , e normalmente é considerada como (BHATTACHARYA & PATRA, 1968):

$$\frac{AB}{6} < h < \frac{AB}{5} \quad (4)$$

No entanto, convém ressaltar que a profundidade alcançada depende de diversos fatores, sendo encontrada na literatura até $h=AB/3$ (ROY & APPARAO, 1971). Além da abertura AB dos eletrodos de corrente, a profundidade de investigação nos métodos elétricos é influenciada por diversos fatores: as resistividades das camadas de solo/rocha, ruídos naturais e artificiais, heterogeneidades geológicas laterais; topografia da superfície e do substrato geológico e presença de camadas finas de resistividades distintas. Deste modo, a profundidade de investigação teórica, não necessariamente reflete a profundidade observada. Alguns autores, através de experimentos em laboratório e campo,

identificaram relações de profundidade de investigação versus configuração eletródica para o arranjo Schlumberger (Tabela 1). ROY & APPARAO (1971) encontraram a relação de profundidade de investigação através de estudos teóricos entre campos elétricos estáticos e estacionários em meios homogêneos. BARKER (1989) encontrou a relação apresentada na Tabela 1 através da utilização de curvas de profundidade de investigação característica normalizada. TELFORD *et al.* (1990), injetando corrente contínua em um meio homogêneo através de dois eletrodos instalados na superfície, verificou a relação h/AB de 0,167, ou seja, $h = AB/6$. As diferenças encontradas pelos autores citados devem-se às diferentes metodologias de investigação.

Tabela 1 – Relações de profundidade de investigação versus configuração eletródica para arranjo Schlumberger. AB = separação entre os eletrodos de emissão de corrente elétrica.

AUTORES	PROFUNDIDADE DE INVESTIGAÇÃO
ROY & APPARAO (1971)	AB/4
BARKER (1989)	AB/5,26
BHATTACHARYA&PATRA (1968)	AB/6 < h < AB/5
TELFORD <i>et al.</i> (1990)	AB/6

3.1.2 Interpretação das SEVs - Análise Morfológica

As seções geoeletricas das SEVs correspondem às distribuições verticais das resistividades dentro de um volume determinado de camadas do subsolo. Em função do número de camadas identificadas, as seções de resistividade podem ser classificadas nos seguintes tipos morfológicos:

- Para duas camadas:
 - ascendente ($\rho_1 < \rho_2$) ou descendente ($\rho_1 > \rho_2$)

- Para três camadas (Figura 7):

$$\mathbf{K} (\rho_1 < \rho_2 > \rho_3)$$

$$\mathbf{H} (\rho_1 > \rho_2 < \rho_3)$$

$$\mathbf{A} (\rho_1 < \rho_2 < \rho_3)$$

$$\mathbf{Q} (\rho_1 > \rho_2 > \rho_3)$$

- Para quatro camadas (Figura 7):

- $\mathbf{KH} (\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4)$,

- $\mathbf{QH} (\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4)$

e outras combinações de dos tipos **K**, **H**, **A** e **Q**.

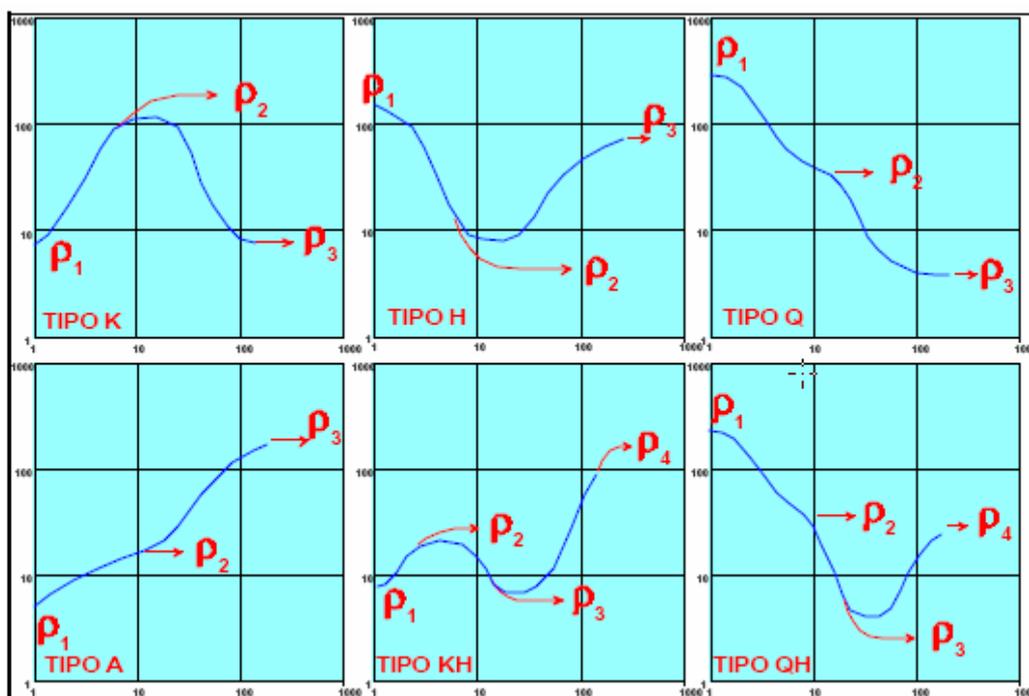


Figura 7 – Morfologia de algumas seções geolétricas, extraída de BRAGA (2002).

A análise morfológica das SEVs define de maneira qualitativa, o modelo geolétrico a ser utilizado na análise quantitativa.

3.1.3 Análise quantitativa das SEV's.

Depois de efetuada a análise morfológica da curva de resistividade aparente em função da meia abertura $AB/2$ e conseqüente entendimento da seqüência de resistividades, procede-se a análise quantitativa dessas camadas, o qual resultará

num modelo geoeletrico. Amplamente utilizados nos dias de hoje é o processo da inversão, efetuada por meio de software para microcomputadores, constituindo-se em um método rápido e preciso. Uma maneira para realizar esta análise é através de ajustes interativos semi-automáticos e automáticos, entre os valores de resistividade aparente das SEVs obtidos em campo e os valores obtidos pelo cálculo computacional do modelo de resistividades elétricas das camadas de solo/rocha com as respectivas espessuras. Esta etapa é realizada através de algoritmos computacionais em uma dimensão. O software disponível para este cálculo é IPI2win (BOBACHEV *et al.* 1999), onde o cálculo das resistividades aparentes é solucionado através do uso de algoritmo de filtragem linear desenvolvido na Universidade Estatal de Moscow. O problema inverso é solucionado usando uma variante do algoritmo de Newton para ajuste das resistividades e espessuras das camadas ou o algoritmo de minimização regularizada do ajuste, através da abordagem de regressão em cadeia suavizada para solução de problemas instáveis proposta por TIKHONOV & ARSENIN (1977). A informação inicial das profundidades das camadas e suas resistividades são obtida da análise morfológica e serve de modelo inicial para a regularização do processo de minimização das diferenças do ajuste entre os valores de resistividade aparente obtidos em campo e aqueles calculados pelo modelo.

3.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE SOLOS E ROCHAS

A natureza elétrica de um material é caracterizada por sua resistividade, constante dielétrica e temperatura. Segundo McNeill (1980) os principais fatores que afetam a resistividade elétrica nos materiais geológicos próximos à superfície, são:

- Conteúdo de água
- Porosidade (espaços vazios entre os grãos minerais)
- Salinidade (o aumento da concentração de sais na água aumenta a condutividade elétrica proporcionalmente)

- Conteúdo de argilas e de minerais condutivos (a argila é tipicamente muito condutiva)
- Composição mineralógica.

Assim o parâmetro resistividade varia entre amplos limites, mesmo para um mesmo tipo de rocha, como pode ser observado na Tabela 2. Dentre esses fatores, os mais importantes são, sem dúvida, a quantidade de água contida e a salinidade dessa água. O aumento do teor de umidade e da quantidade de sais dissolvidos reflete em uma diminuição dos valores de resistividade. Essa condição é que permite a imensa possibilidade de aplicação de métodos elétricos em estudos ambientais e hidrogeológicos, pois a presença de água e de contaminantes, que são normalmente ricos em sais e outros eletrólitos, são de uma maneira geral, facilmente detectados através de medidas de resistividade elétrica.

Tabela 2 - Valores de resistividades elétricas nos solos e rochas comuns na área de estudo. Adaptado de ABNT-NBR 7117 (1981), BRAGA (2002), FIGUEIRÓLA (1974), ORELLANA (1972), REYNOLDS (1997), SHARMA (1997) e TELFORD et al. (1990),

Materiais	Resistividade (Ohm.m)
Argila	10 – 100 1 -100
Argila Seca	1 500 – 5 000
Argila 40% umidade	80
20% umidade	330
Areia Seca	3 000 – 8 000
Areia Saturada	1300
Aluvião	10 – 1 000
Solo Argiloso	≤ 20
Solo Argilo-arenoso	20 – 40
Solo Arenoso-argiloso	40 – 60
Solo Arenoso	≥ 60
Solo Arenoso Seco	80 – 1 050
Solo Argiloso Seco	8 - 1 000
Solo Argiloso Saturado	10 – 100
Solo Laterítico	120 – 750
Laterita	800 – 1 500
Cascalho Seco	1400
Cascalho Saturado	100
Conglomerados	1 000 – 10 000 2 000 – 10 000
Siltito Argiloso	10 – 60
Siltito Arenoso	10 – 60
Arenito	50 – 1 000 10 – 100 000 000 1 – 640 000 000

3.3 EQUIPAMENTO – SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL (SEV)

O equipamento utilizado é um resistivímetro modelo SYSCAL R2 possui um conversor DC/AC (*Direct current/alternated current*), que permite uma tensão de saída máxima de 800 V e apresenta um sistema de empilhamento contínuo de medidas para redução dos ruídos. Efetua o cálculo de fator geométrico (K), que

pode ser calculado através da Equação (2) (pág. 20) e mede o potencial espontâneo antes da realização das medidas, para posterior compensação.

Pode armazenar na memória os valores de intensidade de corrente, tensão, potencial espontâneo, indicação da qualidade de leitura e resistividade aparente. O equipamento é de fabricação da empresa Íris, com potência máxima de 250 W e voltagens de saída reguláveis em 100V, 200V, 400V e 800 V. (Figura 8). Foram utilizados: Oito eletrodos de aço inoxidável para corrente e para potencial, dois fios com 10 m de comprimento para conexão com os eletrodos de potencial, dois carretéis de fios com 150 m cada para conexão dos eletrodos de corrente, três marretas, três garrafas com solução de cloreto de sódio e duas trenas de 50 m.



Figura 8 – Resistivímetro Syscal R2- Íris. À esquerda o conversor de corrente e à direita o console principal.

3.4 RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) - Ground Penetrating Radar.

O método GPR consiste em obter uma imagem de alta resolução da subsuperfície, através da transmissão de um curto pulso de alta frequência para gerar ondas eletromagnéticas (EM), que por sua vez é repetidamente radiada para dentro da terra por uma antena transmissora colocada na superfície. As mudanças

das propriedades elétricas em subsuperfície fazem com que parte do sinal seja refletida e parte refratada. As ondas refletidas em subsuperfície são recebidas por outra antena (receptora), também em superfície. Além destas ondas refletidas, chegam também na antena receptora as ondas aéreas e as *groundwave* (ondas diretas no solo). Estas últimas viajam diretamente de uma antena para outra, respectivamente pelo ar e pelo solo. A antena receptora envia o sinal para um console central e este por sua vez digitaliza e envia os dados para um microcomputador onde as amplitudes das ondas que chegaram na antena receptora são registrados na forma de um traço em função do tempo de percurso. (Figura 9). A seqüência de traços adquiridos podem ser imediatamente vistos lado a lado na tela do computador, formando uma imagem da subsuperfície.

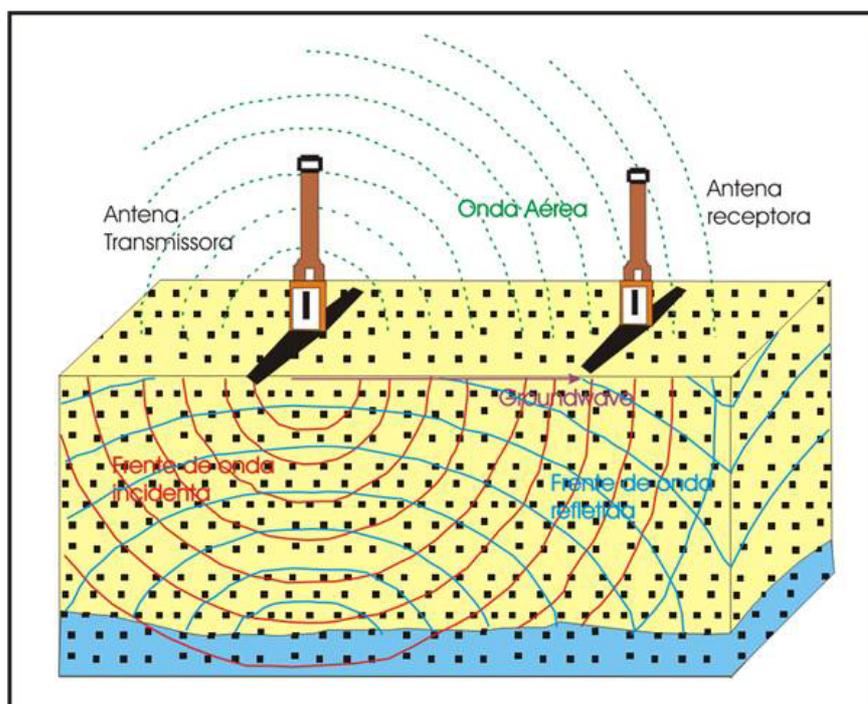


Figura 9 – Diagrama de um par de antenas bi-estática (Borges 2002).

3.5 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A Figura 10 mostra uma onda eletromagnética com suas duas principais componentes: O campo elétrico (**E**) e o campo magnético (**H**). Os planos x e y e a

direção de propagação e de perturbação da onda eletromagnética são perpendiculares entre si.

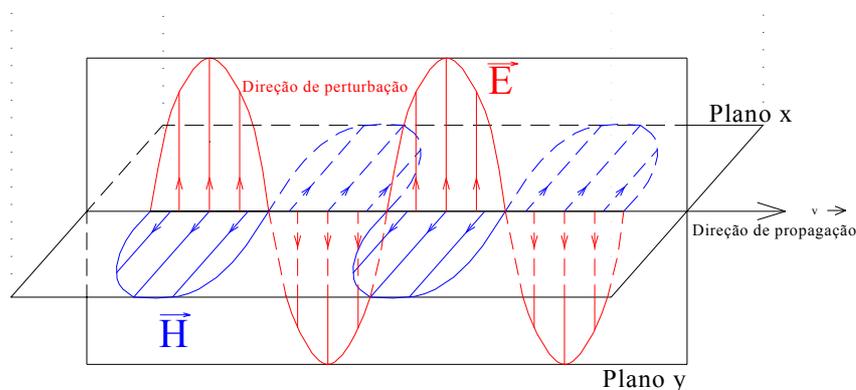


Figura 10 – Propagação da onda eletromagnética

A propagação destas ondas é fundamentada nas equações de Maxwell. Uma das equações é conhecida como Lei de Ampère (Equação 5), que associa a taxa de variação temporal da corrente de deslocamento ($\partial\mathbf{D}/\partial t$) e a densidade de corrente de condução (\mathbf{J}), produzindo o campo magnético (\mathbf{H}):

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial\mathbf{D}/\partial t \quad .(5)$$

A outra equação de Maxwell é conhecida como Lei de Faraday (Equação 6) que descreve a variação do campo elétrico (\mathbf{E}) produzido pela variação do campo de indução magnética (\mathbf{B}) em relação ao tempo:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \partial\mathbf{B}/\partial t \quad (6)$$

Apesar de descreverem o comportamento do campo eletromagnético, as equações de Maxwell não contêm informações sobre as propriedades elétricas dos materiais em que este campo atua. Daí torna-se importante conhecer as propriedades físicas dos materiais geológicos investigados. Para uma melhor compreensão do campo eletromagnético aplicado aos estudos na subsuperfície é

necessário conhecer as propriedades elétricas e magnéticas dos solos e rochas. A interação destes campos com a matéria são descritos pelas três relações constitutivas do meio. Estes materiais podem ser caracterizados por três propriedades elétricas:

- a) Condutividade elétrica (σ);
- b) Permissividade dielétrica (ϵ);
- c) Permeabilidade magnética (μ).

Como mostra a Lei de Ohm, a condutividade relaciona a densidade de corrente de condução (\mathbf{J}) ao campo elétrico (\mathbf{E}) e representa a primeira relação constitutiva do meio:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

Geralmente a movimentação de íons por meio de solução aquosa constitui o principal mecanismo de corrente de condução. Este tipo de corrente surge quando um campo elétrico é aplicado e os íons livres são induzidos a se moverem até atingirem uma velocidade final constante. Depois de removido os campos elétricos às cargas elétricas param de se mover. A Figura 11 ilustra este fenômeno.

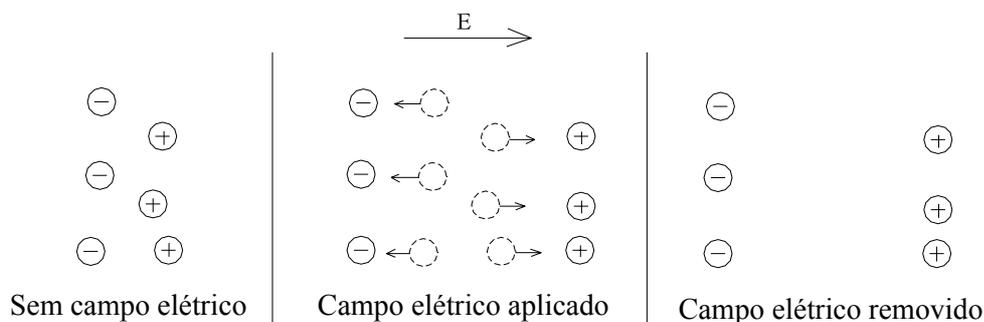


Figura 11 – Movimentação de cargas associada à corrente de condução (ANNAN, 1992).

A permissividade dielétrica dos materiais geológicos (ϵ) aparece na segunda relação constitutiva do meio e relaciona o vetor densidade de corrente de deslocamento (\mathbf{D}) com o vetor campo elétrico (\mathbf{E}):

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (8)$$

O deslocamento das cargas é caracterizado pela movimentação dos elétrons, núcleos e moléculas polares da posição de equilíbrio neutro para outra polarizada devido à influência de um campo elétrico externo. A Figura 12 ilustra este deslocamento. A corrente de deslocamento é representada pela variação da densidade de momentos de dipolo de meio. Cessado o campo elétrico, as cargas se movem para retornar à posição de equilíbrio original.

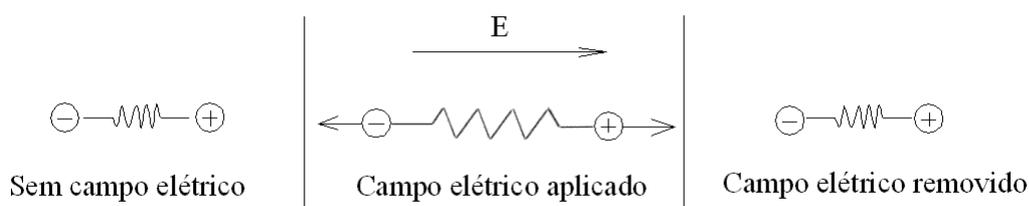


Figura 12 – Movimentação de cargas associada à corrente de deslocamento (ANNAN, 1992).

Em geral, a condutividade é dominante para ondas EM de baixa frequência e a permissividade é dominante para altas frequências. A permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) é definida como sendo a razão entre a permissividade dielétrica do material (ϵ) e a permissividade dielétrica do espaço livre ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m) e está apresentada na Equação (9):

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (9)$$

Define-se a constante dielétrica do material (ϵ'_r) como a parte real da permissividade elétrica relativa (ϵ_r).

A terceira relação constitutiva do meio relaciona o campo de indução magnética (\mathbf{B}) com o campo magnético (\mathbf{H}) através da permeabilidade magnética (μ) e é representada pela Equação (10):

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (10)$$

Na propagação de ondas na frequência do radar a permeabilidade magnética, na maioria dos materiais, independe da frequência e não varia muito em relação à permissividade dielétrica do espaço livre. A permeabilidade

magnética não deve ser ignorada em materiais ferromagnéticos, pois neles os efeitos tornam-se significativamente fortes.

Substituindo-se as relações constitutivas (7, 8 e 10) nas equações de Maxwell (5 e 6), obtém-se:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial(\varepsilon \mathbf{E})}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{-\partial(\mu \mathbf{H})}{\partial t} \quad (12)$$

Supondo que os campos \mathbf{E} e \mathbf{H} variam harmonicamente com o tempo na forma $e^{i\omega t}$, e que $\partial/\partial t \equiv i\omega$, onde $\omega = 2\pi f$, obtém-se:

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + i\omega\varepsilon) \mathbf{E} \quad (13)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu \mathbf{H} \quad (14)$$

A partir destas duas equações, por manipulação algébrica, obtém-se a equação diferencial da onda cuja solução para onda plana que se propaga na direção vertical é:

$$E_x(z, t) = E_0 + e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (15)$$

onde

E_x é a magnitude da componente horizontal do campo elétrico na direção x ;

E_0 é a magnitude do campo elétrico na superfície ($z = 0, t = 0$);

α é a constante de atenuação da onda

β é a constante de propagação da onda.

Os fatores mais importantes que governam a propagação da onda EM num determinado meio são a velocidade e a atenuação. A primeira função exponencial é o termo da atenuação e a segunda é o termo da propagação da onda eletromagnética. Para materiais geológicos com baixa perda, o campo EM se propaga com uma velocidade de propagação dada por:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (16)$$

Onde c é a velocidade da luz, dada por: $C = 2,997 \times 10^8 \text{ m/s} = 0,30 \text{ m/ns}$

e ϵ_r' é a constante dielétrica dos materiais:

Na prática, a constante de atenuação ou absorção é expressa por:

$$\alpha = 1,636 \cdot \frac{\sigma_0}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (17)$$

Conforme OLHOEFT (1984), a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas no meio é altamente dependente das propriedades elétricas dos materiais que o constituem, e que por sua vez influenciam a atenuação (α) da onda eletromagnética. A profundidade de penetração da onda nos materiais pode sofrer perdas por atenuação de quatro maneiras diferentes (DUKE, 1990, apud PORSANI, 2002):

- a) **por condução elétrica**: acontecem mais nos materiais condutivos, como por exemplo a argila;
- b) **por polarização**: geralmente acontecem para as altas frequências, cerca de 20 GHz, denominada de frequência de polarização ou de relaxação. A molécula de água sofre o efeito de rotação por não conseguir mais se polarizar na presença de um campo elétrico aplicado, este processo é conhecido por relaxação dielétrica da água. Quando isso ocorre o sinal eletromagnético é dissipado na forma de calor;
- c) **por espalhamento geométrico**: a frente de onda se espalha esfericamente e a amplitude do sinal é atenuada;
- d) **por difusão**: são causadas por heterogeneidades significativas do meio, ou seja, quando estas têm tamanhos comparáveis ao comprimento de onda. Geralmente são representadas por buracos de insetos, porosidades, contatos litológicos, entre outras anomalias.

Vários autores, (DAVIS & ANNAN, 1989; ANNAN, 1992) após testes com o GPR, obtiveram valores de constante dielétrica (ϵ_r'), condutividade elétrica

(σ), velocidade da onda (V), e coeficiente de atenuação (α) para alguns materiais mais comuns encontrados nas camadas mais superficiais de solo/rocha (Tabela 3).

Tabela 3 – Materiais geológicos comuns com sua constante dielétrica (ϵ_r), condutividade elétrica (σ_0), velocidade (v) e atenuação (α) observados nas frequências utilizadas no GPR (Porsani, 1999).

Materiais	ϵ_r	σ_0 (mS/m)	V (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0,30	0
Água fresca	81	0,5	0,033	0,1
Argila	5 – 40	2 – 1000	0,06	1 – 300
Solo arenoso seco	2,6	0,14	0,18	0,14
Solo arenoso saturado	25	6,9	0,06	2,25
Solo argiloso seco	2,4	0,27	0,19	0,28
Solo argiloso saturado	15	50	0,07 – 0,09	21

As interfaces, que separam as camadas do solo com diferentes características elétricas, podem sofrer forte impedância elétrica conforme as variações das propriedades de condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética. A quantidade do sinal que deverá ser refletido dependerá desta variação e é expresso pelo coeficiente de reflexão (r_{gpr}). Dependendo das características do meio o sinal também poderá ser refratado por essas interfaces. O coeficiente de reflexão depende principalmente das propriedades elétricas do meio, entretanto, nas frequências de operação do GPR (maior que 10MHz) as correntes de condução podem ser negligenciadas (ANNAN & DAVIS, 1997). A Tabela 4 traz alguns coeficientes de reflexão considerando pares de materiais comuns.

$$r_{gpr} = \frac{\sqrt{\epsilon_1'} - \sqrt{\epsilon_2'}}{\sqrt{\epsilon_1'} + \sqrt{\epsilon_2'}} \quad (18)$$

Tabela 4 – Coeficiente de reflexão para quatro tipos de situações diferentes PORSANI (1999).

De:		Para:		Coeficiente de reflexão
Solo Seco	$\varepsilon_r' = 5$	Água	$\varepsilon_r' = 81$	-0,80
Ar	$\varepsilon_r' = 1$	Solo Seco	$\varepsilon_r' = 5$	-0,38
Solo	$\sigma_0 = 15 \text{ m S/m}$	Ferro	$\sigma_0 = 10^9 \text{ m S/m}$	-1,00
Água	$\varepsilon_r' = 81$	Rocha	$\varepsilon_r' = 8$	0,52

Na primeira situação observa-se que a interface solo seco/água é um excelente refletor para o GPR, apresentando 80% da energia incidente. Isto mostra que o GPR pode ser perfeitamente utilizado para localizar o nível freático. A interface ar/solo seco produz uma forte reflexão com 38% da energia incidente. Para evitar essa reflexão indesejada nos levantamentos GPR, ou pelo menos para minimizar tal reflexão, as antenas devem ser colocadas o mais próximo possível do solo. A interface solo/ferro produz uma reflexão total, sendo a situação ideal para as aplicações do GPR para localizar tubos e dutos metálicos enterrados. A interface água/rocha produz um refletor com 52% da energia incidente. Isso mostra que o GPR também pode ser utilizado sobre a superfície de rios e lagos, desde que estes não sejam muito condutivos (PORSANI 1999).

A profundidade de investigação do GPR é dependente da frequência utilizada, quanto menor a frequência maior a profundidade de alcance, e vice versa. O manual do equipamento GPR fabricado pela RAMAC apresenta um quadro de profundidades de investigação (Tabela 5) que serve como um guia para os trabalhos de campo.

Tabela 5 – Freqüências centrais das antenas versus profundidade máxima de penetração (MALA GEOSCIENCE, 1977).

Freqüência da antena (MHz).	Profundidade máxima de penetração (m).
25	35 - 60
50	20 - 30
100	15 - 25
200	5 - 15
400	5 - 10
1000	0.5 - 4

A profundidade (Z) de um refletor é determinada através da Equação (19) para a reflexão normal da onda:

$$Z = v t / 2 \quad (19)$$

Onde t é o tempo duplo de reflexão da onda eletromagnética no meio, ou seja, o intervalo de tempo entre a onda eletromagnética sair da antena transmissora refletir em uma superfície e atingir a antena receptora.

3.6 AQUISIÇÃO COM GPR

No GPR existem três (3) modos de aquisições principais: o perfil de reflexão com afastamento constante (*common offset*), as sondagens de velocidade CMP – (*Common Mid Point*) e WARR – (*Wide Angle Reflection and Refraction*), e a tomografia de poço. Neste trabalho será comentada somente a primeira técnica e a CMP.

3.6.1 Sondagens de Velocidade CMP

Para converter o tempo duplo dos perfis de reflexão em profundidade, é necessário primeiramente conhecer a velocidade da onda de radar no meio. As sondagens CMP – *Common Mid Point* são usadas para obter a velocidade do sinal GPR no solo/rocha. Na técnica CMP, a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos partindo de um ponto central fixo (Figura 13).

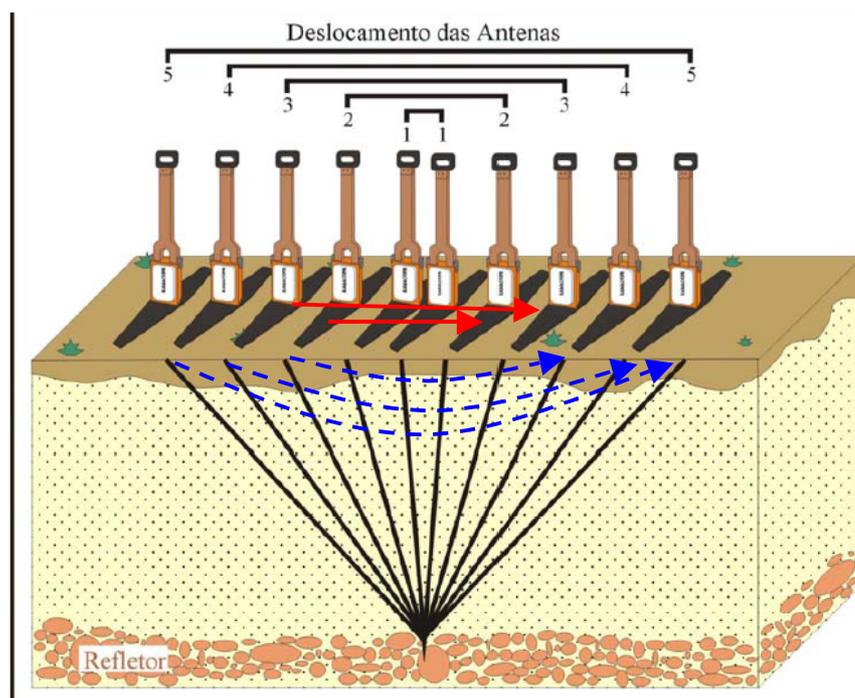


Figura 13 – Sondagem de velocidade do tipo CMP. À esquerda a antena transmissora e à direita a antena receptora. Os números acima indicam a posição seqüencial das antenas durante a aquisição. As linhas vermelhas indicam o caminho das ondas aéreas. As linhas azuis indicam o caminho das ondas diretas no solo. As linhas pretas representam o percurso das ondas refletidas no ponto comum. (Modificado de BORGES, 2002).

Nas sondagens CMP, as antenas estão sempre centradas sobre um mesmo ponto e posicionadas perpendiculares ao trajeto do perfil. As frentes de ondas dominantes que são normalmente observadas nos registros do sinal do GPR são as ondas diretas no ar, as ondas diretas na terra (*ground wave*), seguidas pelas ondas refletidas (Figura 12). Um gráfico do tempo da viagem destas ondas de radar em função da distância de separação das antenas é mostrado na Figura 14.

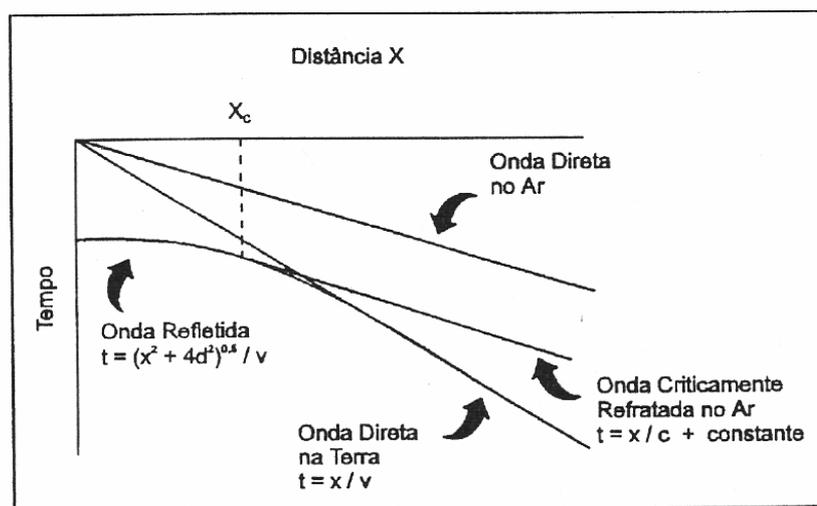


Figura 14 - Gráfico idealizado do tempo de viagem das diferentes ondas de radar em função da distância (x) de separação das antenas numa sondagem do tipo CMP (ANNAN, 1992).

A estimativa da velocidade para as ondas na terra é feita através da análise de *Semblance* que procura medir a amplitude empilhada do sinal dado por YILMAZ (1987):

$$semblance = \frac{1}{n} \frac{\sum_t s_t^2}{\sum_t \sum_i a_{i,t}^2} \quad (20)$$

Onde: s = amplitude do traço empilhado; a = amplitude de cada traço do conjunto; t = janela de tempo; i = número de traços do grupo e $s_t = \sum a_i$.

3.6.2 Caminhamento com afastamento constante

No perfil de reflexão de afastamento constante as antenas são mantidas a um espaçamento (s) fixo, e as medidas são efetuadas passo a passo, com passo (p) constante, ao longo do perfil. O resultado obtido é uma imagem onde o eixo horizontal representa a posição das antenas (distância) e o eixo vertical é o tempo duplo do sinal GPR (Figura 15), isto é o tempo de ida e volta.

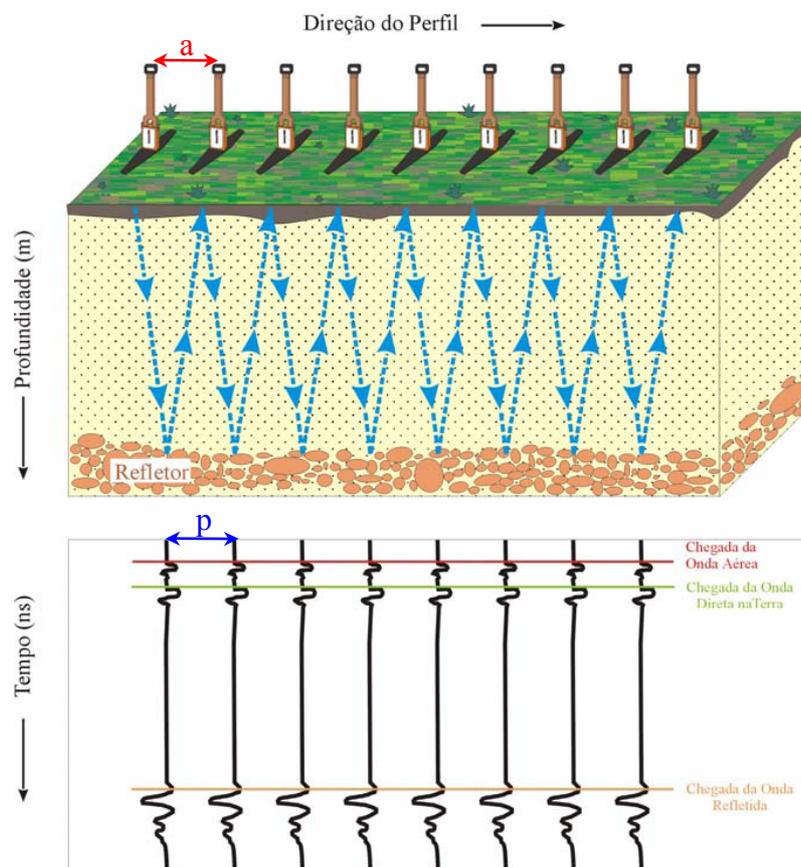


Figura 15 – Esquema de aquisição com GPR, no modo caminhamento, passo a passo (p), com afastamento constante. a) Procedimento envolvendo movimentos repetitivos das antenas transmissora e receptora, com espaçamento constante (a) entre as antenas; b) oito traços esquemáticos de GPR mostrando a chegada da onda aérea, da onda direta na terra e da onda refletida no substrato em subsuperfície. (modificado de BORGES, 2002).

3.7 PROCESSAMENTO E APRESENTAÇÃO DOS DADOS

Após a aquisição dos dados de GPR, é necessária uma seqüência de processamentos para melhorar os sinais, eliminando ruídos e ressaltando os refletores de interesse. Para processar os dados do caminhamento passo a passo, esta seqüência envolve a seguintes etapas:

- 1) Verificar e editar o arquivo de cabeçalho, com as informações da aquisição;
- 2) Verificar e editar o arquivo de dados contendo os traços com o registro das ondas recebidas.
- 3) Ajuste na posição da superfície, ou ajuste do tempo zero.
- 4) Análise do espectro de freqüências dos dados e definição das freqüências de corte para os filtros que correspondem a ruídos de baixa ou alta freqüência.
- 5) Filtragem ou remoção dos componentes de baixa e de alta freqüência dos dados que estão associados com ruídos;
- 6) Amplificação dos sinais de baixa amplitude, para permitir uma melhor visualização dos sinais mais fracos.
- 7) Conversão tempo/profundidade.
- 8) Inclusão da topografia.
- 9) Edição para impressão.

Para o processamento das CMPs são efetuados os processamentos dos itens 1, 2 e 3 e a seguir é efetuado o processamento para a análise de velocidades através da técnica de *Seblance*. Para finalizar os resultados são preparados para impressão. Todos os processamentos de dados de GPR foram efetuados utilizando o software RADAN (GSSI, 2003).

3.8 EQUIPAMENTOS - RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR)

O equipamento utilizado foi o sistema sueco RAMAC/GPR (1997). O sistema consiste em seis módulos: 2 antenas, uma transmissora e outra receptora, uma unidade eletrônica do transmissor, uma unidade eletrônica do receptor, uma unidade de controle central e um computador portátil (Figura 16 e 17).

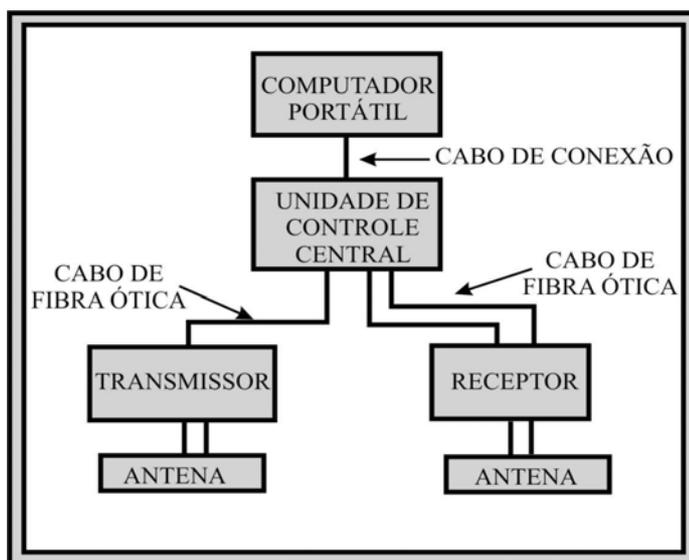


Figura 16 – Esquema do sistema do GPR, com as seis partes básicas: duas antenas, transmissora e receptora, controle central e microcomputador.



Figura 17 – Conjunto RAMAC/GPR. A) computador portátil. B) unidade de controle central. C) antenas transmissora e receptora de 50 MHz e 100 MHz; D) hastes de transporte das antenas. E) separador das antenas.

3.9 NIVELAMENTO

3.9.1 A topografia do terreno

Foi realizada com nível óptico automático Basic Level/Leica Geosystems, uma régua de visada de 3 m com divisões de 1 cm e 2 trenas de 50 m, como mostra a Figura 18.



Figura 18 - Equipamento utilizado para realização do nivelamento do terreno. A) – Nível óptico; B) – Régua de Visada; C) - Trena; e D) – Tripé.

3.9.2 Características técnicas do nível óptico

- **Acurácia:** Desvio padrão/km menor que 3 mm em duplo nivelamento.
- **Luneta:** Aumento de 20 x; Campo de visão a 100 m maior que 2,3 m; menor distância do alvo do eixo do instrumento menor que 1 m.
- **Medição de distância:** Fator de multiplicação = 100 e constante de adição = 0.
- **Compensador:** intervalo de trabalho = $\pm 10'$ (desvio padrão menor que $1''$).
- **Sensibilidade do nível circular:** $8' / 2\text{mm}$.

3.9.3 Princípios do Nivelamento

A Figura 19 - ilustra como determinar a diferença de altitude ΔH entre dois pontos A e B utilizando um nível óptico. O nível é colocado entre os dois pontos e são efetuadas duas visadas no mesmo nível, uma à ré (R) no ponto A e outra para vante (V) no ponto B. As visadas são feitas numa régua graduada colocada em cada ponto. A diferença das leituras à ré e a vante corresponde ao desnível de altitude ΔH .

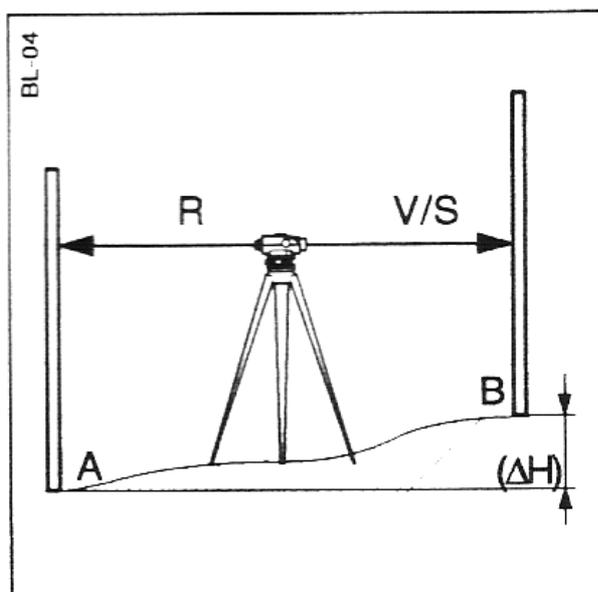


Figura 19 - Esquema de para determinar o desnível altitude ΔH entre os pontos A e B.

$$\Delta H = h_A - h_B \quad (21)$$

onde h_A é a leitura na régua à ré no ponto A e h_B é a leitura na régua a vante no ponto B.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os levantamentos campo foram realizados em etapas. As Sondagens elétricas verticais (SEVs) foram realizadas em setembro de 2002 e as linhas de GPR em setembro de 2004, juntamente com o levantamento topográfico.

A foto da Figura 20 mostra a vertente da área estudada, onde foram realizadas as SEVs, as linhas de GPR e o nivelamento topográfico.



Figura 20 – Vista da vertente onde foram realizados os ensaios geofísicos. Em primeiro plano aparece o piezômetro que indica o início da linha de GPR cuja direção é a borda direita das árvores no topo da vertente. A SEV 1 (bandeira branca na foto) foi realizada a 10 m do piezômetro.

4.1 Sondagem Elétrica Vertical

Foram realizadas 5 SEVs, espaçadas de 100 em 100 m, ao longo da linha subindo a vertente (mostrada na foto da Figura 20) e denominadas de SEV1, SEV2, SEV3, SEV4 e SEV5, seguindo as posições mostradas no croqui da Figura 21. O arranjo utilizado foi o Schlumberger, com AB/2 máximo de 150 metros.

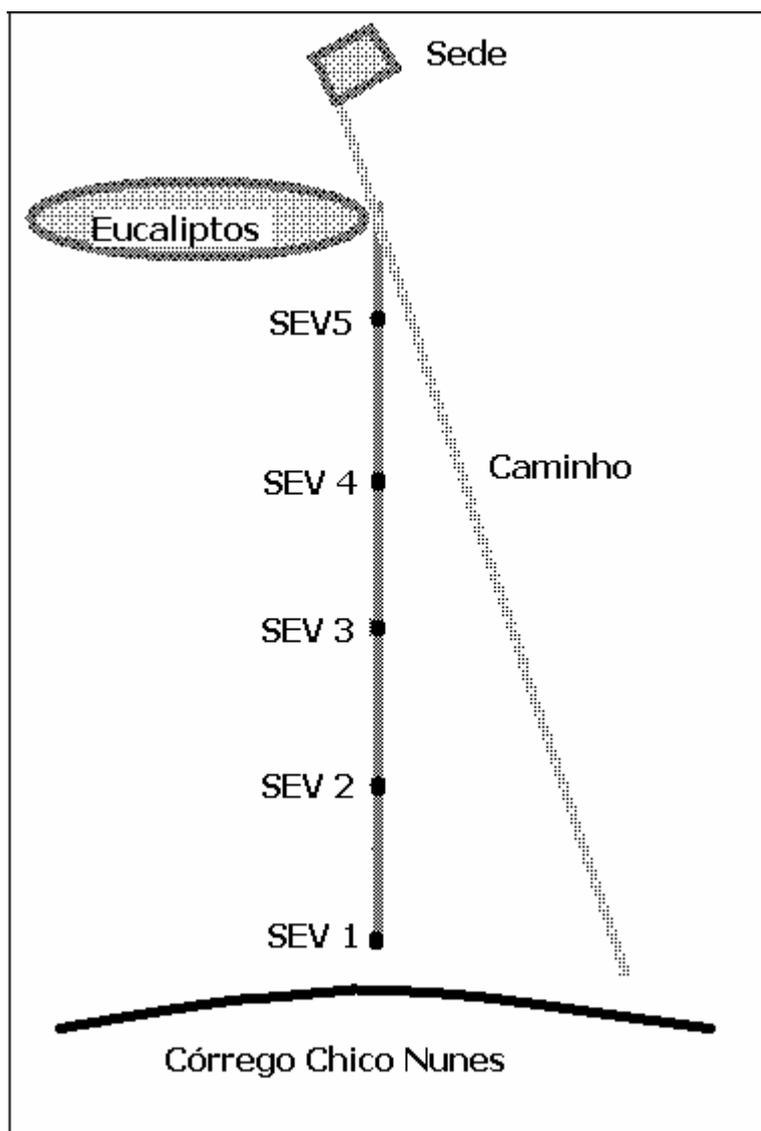


Figura 21 – Localização das SEVs realizadas. As SEVs estão espaçadas de 100 em 100 m.

4.1.1 Resultados e Análise morfológica

As sondagens foram efetuadas com o objetivo de investigar as camadas de solo/rocha e o nível do lençol freático na vertente. Todas as SEVs tiveram os eletrodos de emissão de corrente (AB) alinhados na direção paralela às curvas de nível do terreno. Os resultados dos levantamentos de campo estão apresentados no gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente em função da separação dos eletrodos de corrente AB/2 Figura 22 e as **planilhas de campo** encontram-se no **Anexo I**. Observa-se que no geral as curvas têm o mesmo comportamento morfológico, caracterizando um sistema do tipo K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$) de três camadas como visto no item 3.1.2., com valores de resistividade aparente inicialmente em torno de 300 Ohm.m, subindo até valores acima de 1 000 Ohm.m e depois diminuindo rapidamente, atingindo valores tão baixos quanto 100 Ohm.m. Com exceção da SEV1, as outras quatro SEVs apresentam na posição AB/2 = 4,2 m, uma pequena inflexão que sugere a existência de uma quarta camada, com resistividade intermediária, exibindo uma morfologia do tipo AK ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) de quatro camadas. Para as aberturas AB/2, maiores que 50 m as SEV2 e SEV5 apresentam valores de resistividade aparente um pouco maiores do que as SEV1, SEV3 E SEV4.

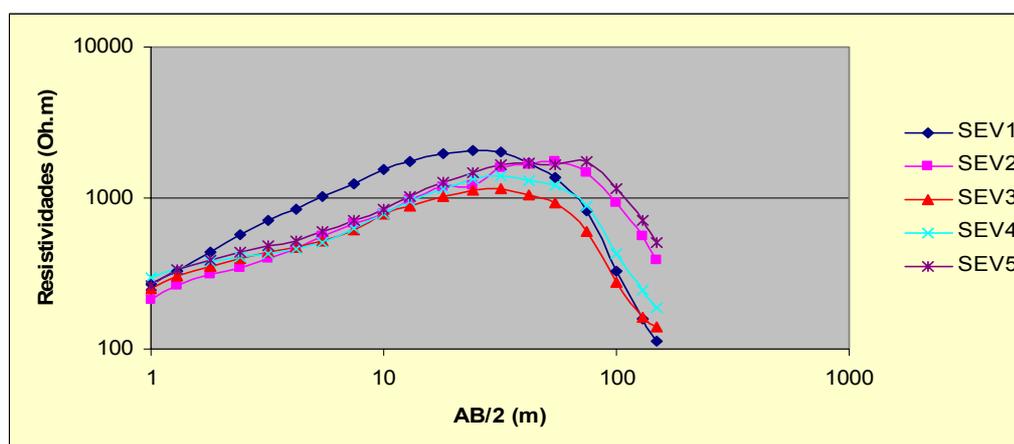


Figura 22 - Curva de Resistividade Aparente em função da abertura AB/2 das cinco SEVs.

4.1.2 Modelos Geoelétricos Quantitativos.

A partir das curvas de resistividade aparente em função da meia-abertura entre os eletrodos de corrente ($AB/2$) as SEV's foram calculados os modelos geoelétricos utilizando o software IPI2win (BOBACHEV et al., 2001). Os resultados encontram-se nas Figuras 23, 25, 27, 29 e 30, onde os valores de resistividade aparente medido em campo aparecem em círculos unidos por linha preta. A curva de resistividade aparente, em função da meia abertura $AB/2$, calculada pelo programa a partir do ajuste do modelo de camadas, aparece em linha vermelha. A linha azul representa o modelo de camadas, com as profundidades de cada camada no eixo horizontal (em metros) e as resistividades elétricas de cada camada no eixo vertical em (Ohm m). Para a interpretação pedológica/geológica os dados de texturas de solo/rocha foram efetuados com base no trabalho de GONÇALVES (2003) que considerou as análises de furos de sondagens a trado e trincheiras, abertas no local.

A SEV 1, representa um modelo morfológico de 3 camadas (Figura 23). Entretanto para um melhor ajuste a segunda camada foi subdividida em 4 camadas. Assim o erro no ajuste entre a curva de campo e a curva calculada do modelo, não tem resolução foi de 4.72%.

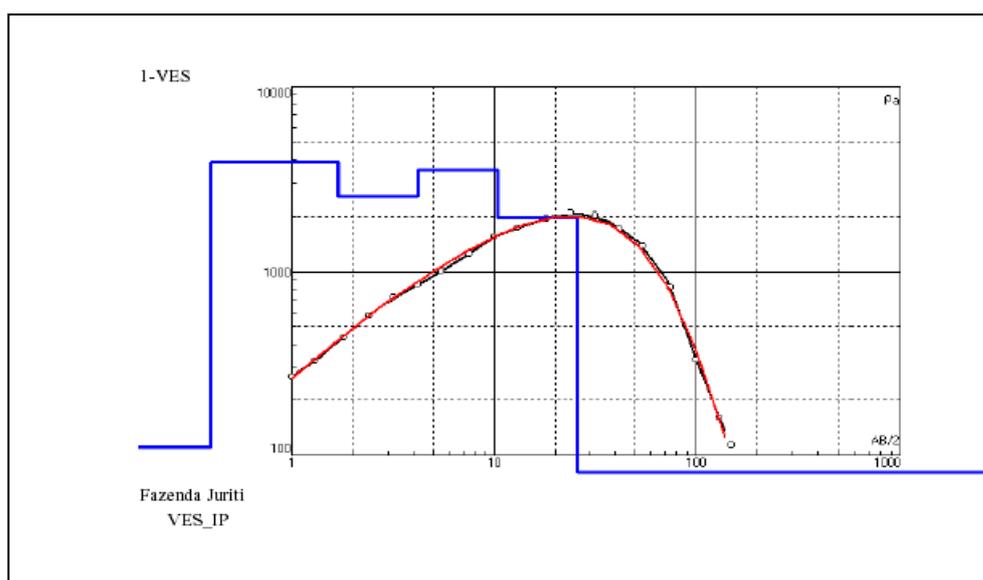


Figura 23 – Gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente da SEV1 (círculos pretos) em função da meia-abertura $AB/2$ dos eletrodos de corrente, e curva da resistividade aparente calculada (linha vermelha) a partir do modelo (ajustado pelo programa IPI2win) para camadas horizontais (linha azul).

O resultado do modelo de camadas mostra a primeira camada com baixa resistividade (111 Ohm m.) com uma espessura de 0,4 m, horizonte Ap. A segunda camada com 1,3 m de espessura e resistividade 3897 Ohm.m, poderia corresponder ao horizonte C com plintitas. A terceira camada tem espessura 2,5 m e resistividade 2550 Ohm.m, horizonte C. A quarta camada tem resistividade 3538 ohm.m e espessura 6,2 m, horizonte C. A quinta camada tem resistividade 1984 Ohm.m e espessura 15,7 m, horizonte C/Rocha. Na última camada a resistividade cai abruptamente para 42,4 Ohm.m iniciando a 26,1 m de profundidade, Rocha. A Figura 24 mostra os perfis de solo obtidos nas sondagens a trado ST4 e ST5, situados respectivamente a 10 m e 45 m acima da posição da SEV1 na vertente. Observa-se nesta figura que a primeira camada de solo tem textura argilo-arenosa e 0,20 m de espessura. No local da SEV1 foi observado em superfície material de textura areno-argilosa com matéria orgânica que parece corresponder a furos de sondagem a trado, primeira camada desta SEV. A segunda camada (horizonte de transição) parece corresponder à segunda camada do modelo da SEV. A terceira camada da SEV está entre as profundidades de 1,7 m e 4,2 m. Na ocasião da realização da SEV o nível de água no piezômetro situado a 10 m da SEV1 (Figura 20) estava a 2,65 m de profundidade, e com desnível muito pequeno em relação à SEV1. Na ST4 o nível da água (N.A.) estava a 3,5 m de profundidade mas foi realizado em datas diferentes. Assim, não foi possível detectar, com os dados de resistividade, a transição do topo do lençol freático, faz menção aos horizontes 1ª camada ate a 6ª camada.

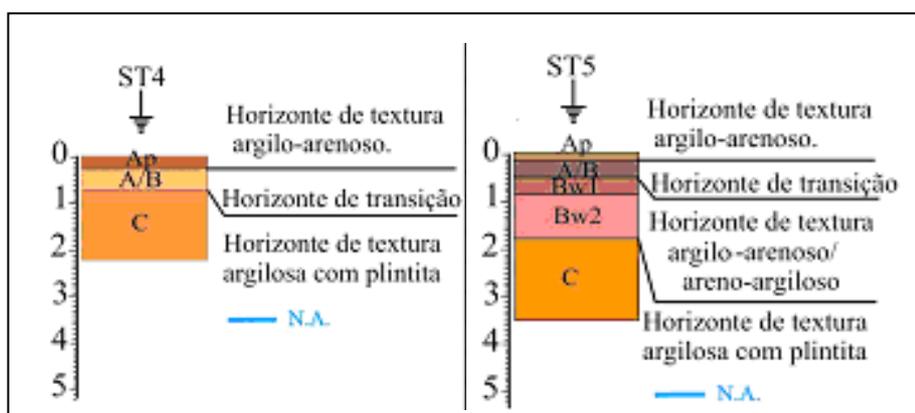


Figura 24 - Perfil de solo no furo de sondagem a trado ST4, 10 m acima da posição da SEV1 e ST5, 45 m acima da SEV1. A escala vertical está em metros. (Modificado de GONÇALVES, 2003)

A camada 4 tem resistividade 3538 Ohm.m, começando a 4,2 m de profundidade e atingindo 10,4 m. Considerando a sua profundidade, está associada ao substrato de rocha alterada correlacionável com a Formação Cachoeirinha. Entretanto verificando a composição da Formação Cachoeirinha, pacotes arenocascalhosos intensamente cimentados por óxido de ferro, num local bem próximo da Escarpa - afloramento (WESKA et al. 1993), deveriam ter baixa resistividade.

A camada 5 logo abaixo da 4, tem resistividade 1984 Ohm.m e atinge 26,1 m de profundidade. Considerando novamente a profundidade, esta camada está associada às rochas da Formação Cambambe. Abaixo da profundidade de 26,1 m a resistividade caiu para 42,4 Ohm.m., indicando a presença de rocha saturada argiloarenoso similar ao citado por BRAGA, (2002). Esta consideração baseia-se em dados de WESKA et al. (1993), afirma que existe um afloramento que mostra o contato entre Cachoeirinha e o Cambambe.

A SEV 2 (Figura 25) iniciou a partir do modelo morfológico do tipo AK de 4 camadas. Entretanto para um melhor ajuste da curva a segunda camada foi subdividida em 2 sub-camadas e terceira camada foi subdividida em 3 sub-camadas, resultando no ajuste de um modelo com 7 camadas. O erro no ajuste entre a curva de campo e a curva calculada do modelo foi de 4.95%.

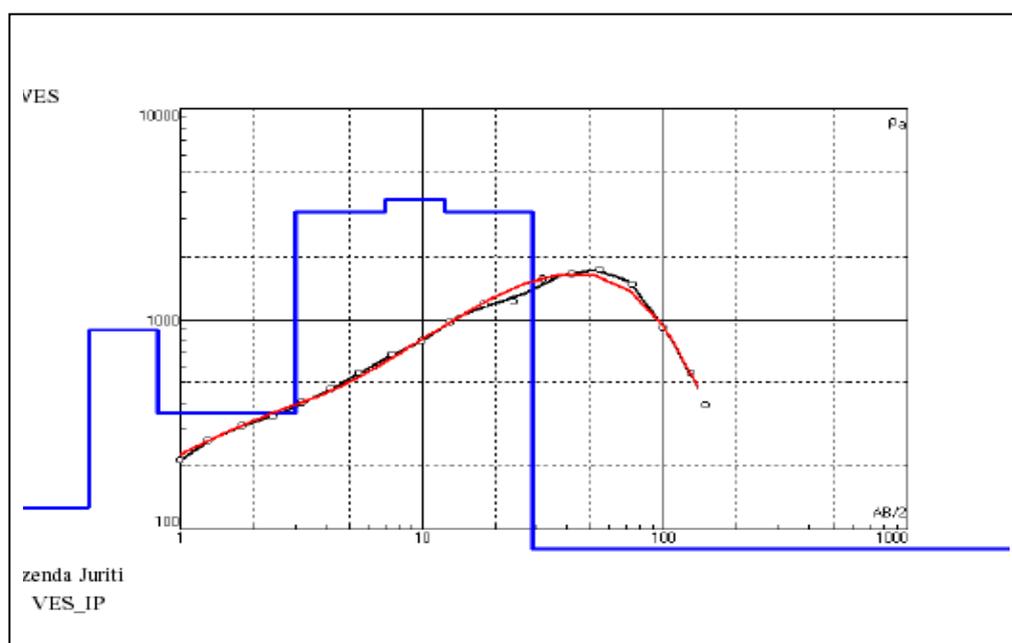


Figura 25 – Gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente da SEV2 (círculos pretos) em função da meia-abertura AB/2 dos eletrodos de corrente, e curva da

resistividade aparente calculada (linha vermelha) a partir do modelo (ajustado pelo programa IPI2win) para camadas horizontais (linha azul).

A análise das camadas eletrorresistivas do modelo da SEV2, foram utilizados os perfis de solo obtidos com sondagens a trado ST6 e ST7 de GONÇALVES (2003) mostrados na Figura 26. A sondagem ST6 foi realizada 20 m antes da SEV2 e a sondagem ST7, 20m depois.

O ajuste da SEV2 mostra uma primeira camada com resistividade 127 Ohm.m e 0,42 m de espessura, associado ao horizonte de solo de textura argilo-arenosa com matéria orgânica. A segunda camada tem resistividade 895 Ohm.m e 0,39 m de espessura, está associado ao horizonte de transição.

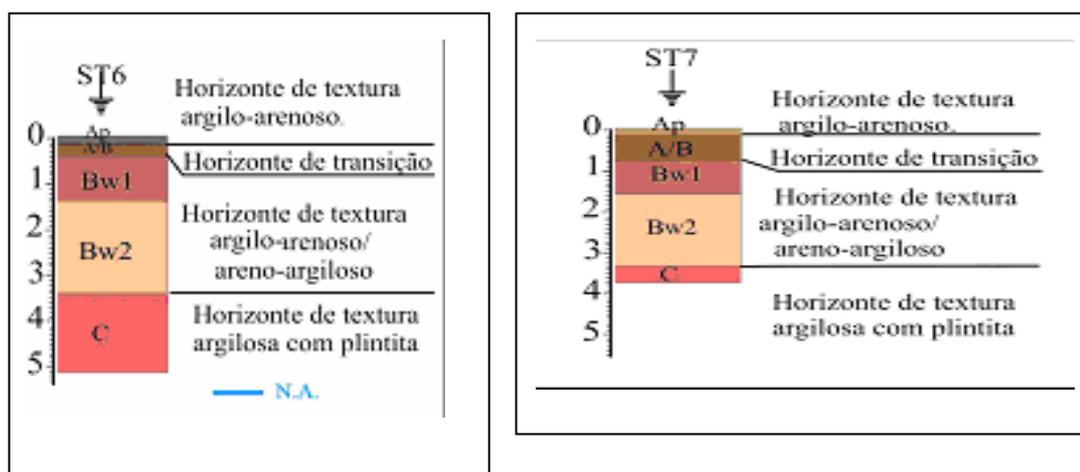


Figura 26 - Perfil de solo no furo e sondagem a trado ST6, 20m antes da SEV2 e ST7 está a 20m depois da SEV2. A escala vertical está em metros. (Modificado de GONÇALVES, 2003).

A terceira camada tem resistividade 350 Ohm.m e 2,16 m de espessura, e está associado ao horizonte de solo argiloarenoso a areno-argiloso. As camadas seguintes, 4, 5 e 6, constituem outro pacote com resistividades altas, entre 3214 e 3690 Ohm.m, iniciando em 3,0 m e atingindo 28,7 m de profundidade. No topo desta camada os furos de sondagens a trado, encontraram um horizonte de textura argilosa com plintitas, que em princípio pode estar indicando a presença da Formação Cachoeirinha que se situa logo abaixo, constituída pelas areias e cascalhos cimentados com óxido de ferro. Abaixo de 28,7m encontra-se a camada 7, onde a resistividade cai abruptamente para 33,4 Ohm.m, indicando a presença de uma

camada saturada de água, possivelmente dentro da Formação Cambambe, constituída por arenitos, arenitos argilosos, microconglomeráticos a conglomeráticos, lentes de conglomerados e brechas intraformacionais e silcretos.

Na Figura 27, está o ajuste da SEV 3, inicialmente um modelo de 4 camadas, que evoluiu para um melhor ajuste da curva em um modelo de 6 camadas. O erro no ajuste entre a curva de campo e a curva calculada do modelo foi de 6.12%.

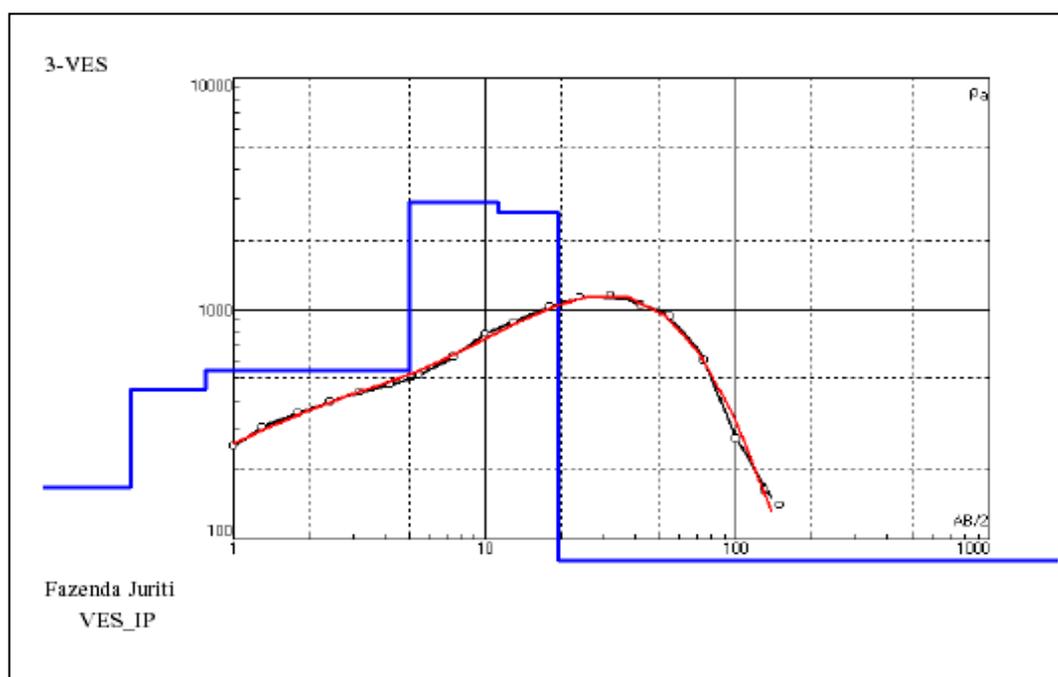


Figura 27 – Gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente da SEV3 (círculos pretos) em função da meia-abertura AB/2 dos eletrodos de corrente, e curva da resistividade aparente calculada (linha vermelha) a partir do modelo ajustado pelo programa IPI2win, para camadas horizontais (linha azul).

Para interpretar as camadas eletrorresistivas da SEV3, utilizou-se os dados do perfil de solo da sondagem a trado ST8 (Figura 28).

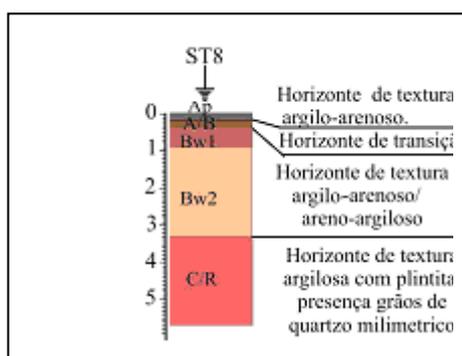


Figura 28 - Perfil de solo no furo de sondagem a trado ST8, esta a 15m abaixo da SEV3. A escala vertical está em metros. (Modificado de GONÇALVES, 2003)

O ajuste da SEV3 mostra uma primeira camada Ap com resistividade 167 Ohm.m e 0,39 m de espessura, associado ao horizonte de solo argiloarenoso com matéria orgânica.

A segunda camada A/B tem resistividade 445 Ohm.m e 0,39 m de espessura, e a terceira camada BW1 e BW2 tem resistividade 541 Ohm.m e 4,22 m de espessura. Estas duas camadas representam um pacote com resistividades intermediárias e correspondem aos horizontes de solo argilo-arenoso/areno-argiloso.

As camadas seguintes, 4 e 5 C/R constituem outro pacote com resistividades altas, 2870 Ohm.m. e 2617 Ohm.m, iniciando a 5 m e atingindo 19,4 m. O topo desta camada apresenta o horizonte de textura argilosa com plintita e presença de quartzo milimétrico, provavelmente associados ao substrato rochoso alterado da Formação Cachoeirinha.

Na camada 6, a resistividade abaixa para 43,8 Ohm.m, está abaixo de 19,4 m e corresponde ao substrato rochoso provavelmente associado à Formação Cambambe saturada com água.

A SEV 4 (Figura 29) representa um modelo morfológico AK de 4 camadas. Para um melhor ajuste da curva a segunda camada foi subdividida em 2 sub-camadas e terceira camada foi subdividida em 2 sub-camadas, resultando em um modelo de 6 camadas. O erro no ajuste entre a curva de campo e a curva calculada do modelo foi de 4.55%.

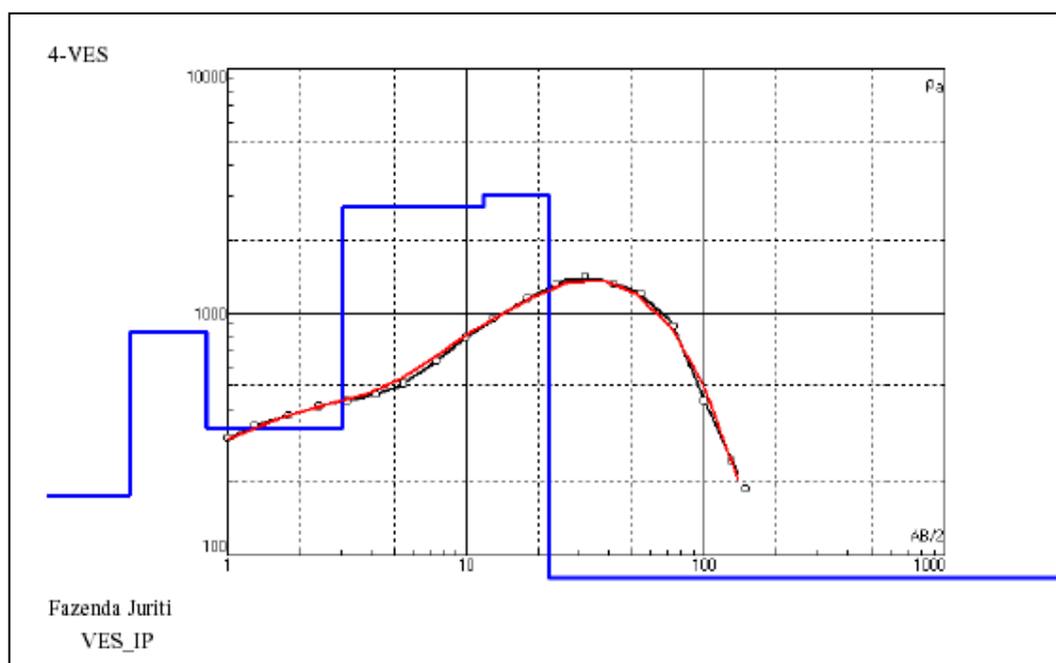


Figura 29 – Gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente da SEV4 (círculos pretos) em função da meia-abertura $AB/2$ dos eletrodos de corrente, e curva da resistividade aparente calculada (linha vermelha) a partir do modelo (ajustado pelo programa IPI2win) para camadas horizontais (linha azul).

Para a interpretação do modelo geológico da SEV4, utilizou-se as informações das interpretações da SEV3 e SEV5. O ajuste da SEV4 mostra uma primeira camada com resistividade 176 Ohm.m e 0,39 m de espessura, associado ao horizonte de solo argilo-arenoso com matéria orgânica. A segunda camada tem resistividade 827 Ohm.m e 0,43 m de espessura, e a terceira camada têm resistividade 335 Ohm.m e 2,20 m de espessura. Estas duas camadas representam um pacote com resistividades intermediárias. Estão associadas ao horizonte de solo argilo-arenoso/areno-argiloso. (BW1 e BW2), mesma camada em termos geofísica.

As camadas seguintes, 4 e 5, constituem outro pacote com resistividades altas, 2700 Ohm.m. e 3000 Ohm.m, iniciando a 3,0 m e atingindo 22,0 m de profundidade a mesma camada, provavelmente associados ao substrato rochoso da

Formação Cachoeirinha, ou seria horizonte C/R. Na camada 6, a resistividade abaixa para 40,5 Ohm.m, está abaixo de 22,0 m esta corresponde ao rocha saturada provavelmente associado à Formação Cambambe.

A SEV 5 (Figura 30) representa um modelo morfológico de 4 camadas. Entretanto para um melhor ajuste da curva a segunda camada foi subdividida em 2 sub-camadas e terceira camada foi subdividida em 2 sub-camadas, resultando em um modelo de 6 camadas. Assim o erro no ajuste entre a curva de campo e a curva calculada do modelo foi de 4.35%.

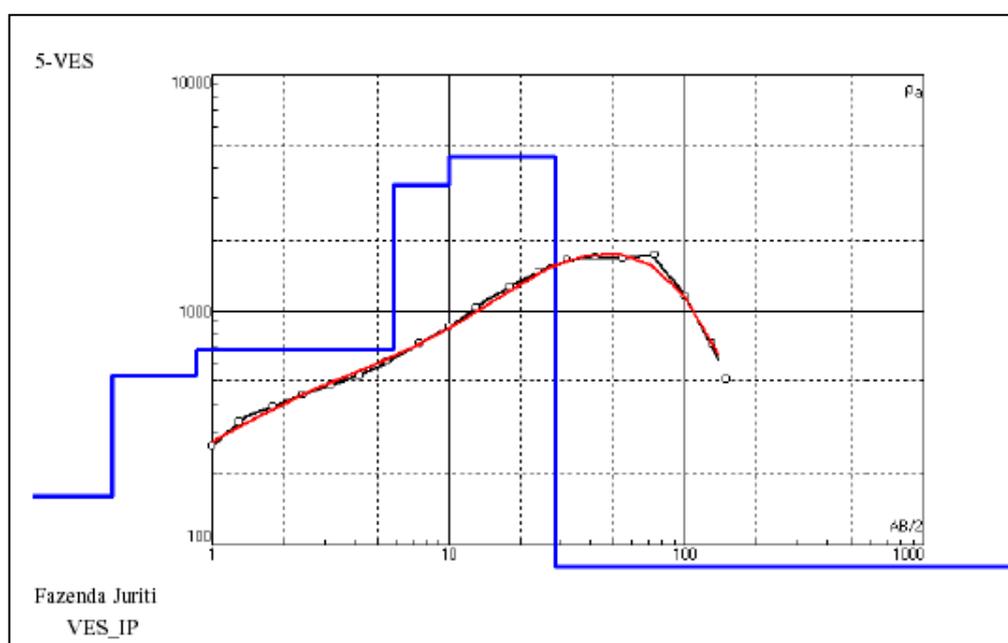


Figura 30 – Gráfico bi-logarítmico da resistividade aparente da SEV5 (círculos pretos) em função da meia-abertura AB/2 dos eletrodos de corrente, e curva da resistividade aparente calculada (linha vermelha) a partir do modelo (ajustado pelo programa IPI2win) para camadas horizontais (linha azul).

O ajuste da SEV5 mostra uma primeira camada com resistividade 162 Ohm.m e 0,38 m de espessura, associado ao horizonte de solo argilo-arenoso com matéria orgânica. A segunda e terceira camadas representam um pacote com resistividades intermediárias, 529 Ohm.m e 676 Ohm.m, respectivamente e apresentam espessuras 0,48 m e 4,98 m respectivamente. Estão associados ao horizonte solos argilo-arenoso/areno-argiloso.

As camadas seguintes, 4 e 5, constituem outro pacote com resistividades altas, 3398 Ohm.m. e 4452 Ohm.m, e estão as profundidades iniciais de 5,8 m e atinge 28,4 m, Estão associados à um substrato rochoso com material da Formação Cachoeirinha. Na camada 6, a resistividade abaixa para 59,1 Ohm.m, está abaixo de 28,4 m e corresponde ao substrato rochoso saturado provavelmente associado à Formação Cambambe.

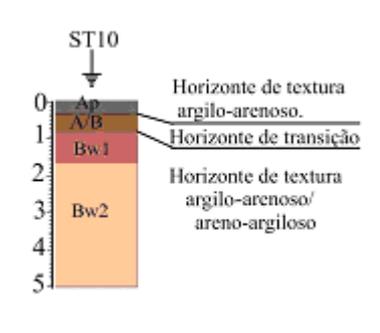


Figura 31 - Perfil de solo no furo de sondagem a trado ST10, 5m antes da SEV5. A escala vertical está em metros. (Modificado de GONÇALVES, 2003).

Os resultados de resistividades dos modelos de camadas com as respectivas espessuras das cinco SEVs estão sintetizados na Tabela 6, e agrupadas conforme os valores de resistividades calculados nos modelos.

Tabela 6 – Resistividade e espessura das unidades geoeletricas encontradas após os modelamentos das curvas das SEV's.

Camada	SEV1		SEV2		SEV3		SEV4		SEV5	
	Esp. (m)	Resist. Ohm.m								
1	0.40	111	0.42	127	0.39	167	0.39	176	0.38	162
2	1.30	3897	0.39	895	0.39	445	0.43	827	0.48	529
3	2.51	2550	2.16	350	4.22	541	2.20	335	4.98	676
4	6.18	3538	4.03	3214	6.22	2873	8.72	2689	4.15	3398
5	15.7	1984	5.40	3690	8.23	2617	10.30	3013	18.40	4452
6		42.4	16.3	3214		43.8		40.5		59.1
7				33,4						

Em todas as SEVS foram encontradas uma primeira camada com espessura inferior a 0,40 m composta pelo primeiro horizonte de solo, com textura argilo-arenosa, contendo matéria orgânica, com exceção na SEV1 onde a textura era areno-argilosa. Os valores de resistividade destas camadas são muito próximos, entre 111 Ohm.m e 167 Ohm.m. Estes valores um pouco acima dos citados por BRAGA (2002) na Tabela 2 do Capítulo 3 (pág. 26), ocorrem em função do aumento da porcentagem de areia e diminuição da umidade. Esta camada está marcada em amarelo na Tabela 6.

Nas SEVs 2, 3, 4 e 5 os valores de resistividades permitiram agrupar as 2^{as} e a 3^{as} camadas em uma camada de resistividade intermediária, entre 335 Ohm.m e 895 Ohm.m, indicadas em azul na Tabela 6. A espessura destas duas camadas varia entre 2,55 m na SEV 2 e atinge 5,46 m na SEV 5. Este pacote foi associado ao horizonte com textura argilo-arenosa a areno-argilosa, com presença de plintitas, encontrado nos furos de sondagem a trado. Estes valores de resistividade também estão muito acima do citado por BRAGA *opus cit.* para solos argilo-arenosos ou areno- argilosos, mas concordam com os valores de Latossolo ou solo laterítico de REYNOLDS (1997, Tabela 2, Capítulo 3, pág. 26). Corresponderia aos horizontes BW1 e BW2 e não ao horizonte C.

Na SEV1, as camadas 2, 3, 4 e 5 tem alta resistividade, assim como as camadas 3, 4 e 5 da SEV2, camadas 4 e 5 das SEV3, SEV4 e SEV5. As resistividades nestas camadas variam entre 1984 Ohm.m até 4 452 Ohm.m. A profundidade mínima deste pacote é 1,3 m na SEV1 e a máxima profundidade é 28,4 m. Este pacote de alta resistividade está marcado em verde na Tabela 6 e foi associado às rochas da Formação Cachoeirinha que aparece logo abaixo da camada de Latossolo na área. A presença de plintitas no solo indicam que as rochas abaixo devem conter óxido de ferro, encontrado na Formação Cachoeirinha.

A última camada, possui baixa resistividade (menor que 59,1 Ohm.m) indicando a presença de material saturado sendo interpretado como Formação Cambambe, pois esta é constituída de arenitos argilosos microconglomeráticos a conglomeráticos, interdigitada por lentes de conglomerados, brechas intraformacionais, arenitos fino a médio e silcretos, com água preenchendo os poros que justificam a baixa resistividade. Na Tabela 6, está indicada com a cor laranja.

4.2 NIVELAMENTO

Foi executado um levantamento topográfico detalhado para linha onde os levantamentos com as SEVs e GPR foram efetuados. Este nivelamento foi executado com nível óptico, uma régua de visada com 3 m e divisões de 1 cm e duas trenas com 50 m. A Figura 32 apresenta o perfil topográfico obtido ao longo da vertente, e o desnível máximo de 15,4 metros. Para se determinar o declive do ponto inicial até o final foi locada uma reta de 451,90 m, e com cota de referência de 583,78 m determinada com um aparelho de GPS. Para a realização das leituras, o tripé com o nível foi colocado entre as curvas de nível e leitura do nível foi realizada com a régua colocada em pontos antes, no topo e após cada curva de nível atravessada, pois entre eles o terreno não apresentava ondulações. Os dados de campo e os cálculos do nivelamento na Tabela 7. Estes dados foram utilizados para corrigir os perfis de GPR e permitir a comparação das profundidades das camadas obtidas nos modelos das SEVs.

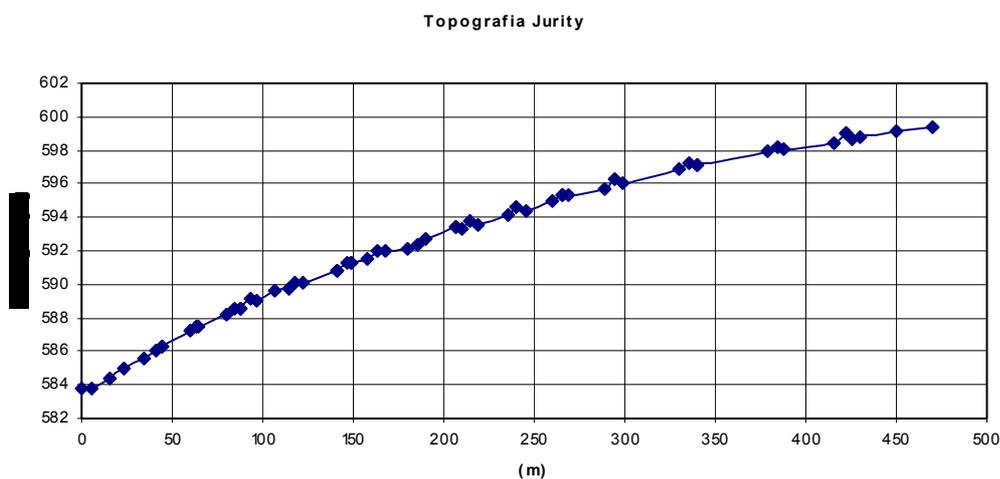


Figura 32 - Gráfico da curva de nível da vertente do Córrego Chico Nunes.

A declividade média do terreno foi de gradiente 13,53 m/m.

4.3 RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO (GPR)

Com o método GPR foram adquiridos dois perfis com afastamento constante utilizando antenas não blindadas de 50 MHz e 200 MHz e uma linha de CMP na base da vertente com antenas de 50 MHz (Figura 33).

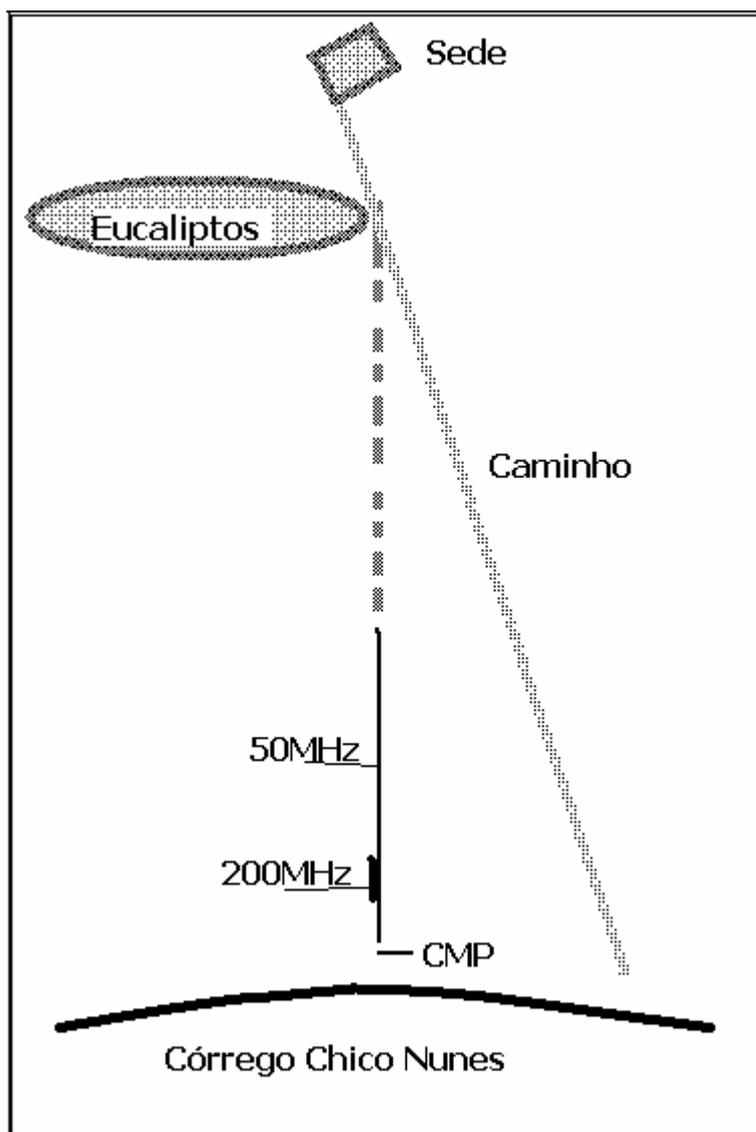


Figura 33 –Localização das duas linhas de GPR realizadas ao longo da vertente, com antenas de 50MHz (linha contínua fina) e 200MHz (linha contínua grossa). A linha de CMP foi adquirida paralelamente ao Córrego Chico Nunes, na base da vertente.

A linha com as antenas de 50 MHz, foi mantido o espaçamento constante de dois metros entre as antenas transmissora e receptora. Esta linha de GPR tem 200 m de comprimento, iniciando na base da vertente junto ao piezômetro mostrado na Figura 20. Foi adquirido a cada metro, um traço médio resultante do empilhamento (*stack*) de 128 traços, num total de 201 traços médios. Cada traço médio foi registrado em uma janela de tempo 1018 ns, contendo 512 amostras.

A aquisição com antenas de 200 MHz foi realizada com auxílio de um rebocador de fibra de vidro (Figura 34), com a antena transmissora separadas de 0,50 m da receptora. Foi adquirido um traço médio a cada 5 cm, resultante do empilhamento (*stack*) de 32 traços, num total de 451 traços médios. O controle da distância foi realizado com uma roda calibrada, conectada ao console central do GPR, que permitiu a aquisição contínua. Cada traço foi adquirido com uma janela de tempo 203 ns, e 512 amostras. Esta linha iniciou a 22,5 m do piezômetro na base da vertente (mostrado na Figura 20) e se estendeu por 22,5m, subindo a vertente.



Figura 34 –Linha de GPR no início da vertente com antenas de 200 MHz. (Foto à esquerda). Antenas no rebocador de fibra de vidro (foto à direita).

Para converter o tempo duplo dos sinais refletidos em profundidade nos perfis caminhamento com afastamento constante, a velocidade da onda de radar no meio foi determinada através da sondagem CMP - (Common Mid Point), realizada com os traços adquiridos afastando-se as antenas de 20 em 20 cm para cada lado, atingindo um afastamento total de 50 m entre as antenas. Cada traço médio foi resultado do

empilhamento de 128 traços. A janela de tempo utilizada foi de 1018 ns. A frequência de amostragem correspondeu a 502,78 MHz. Os traços adquiridos são visualizados no modo *Linescan*, (Figura 35) onde as amplitudes de cada traço são representadas na forma intensidade de cor. A convenção de cor utilizada é vermelha para valores positivos e azuis para valores negativos de amplitude. O branco corresponde à amplitude zero. Cada traço é representado verticalmente, lado a lado, na figura permitindo uma visualização dos instantes de chegada do sinal na antena receptora.

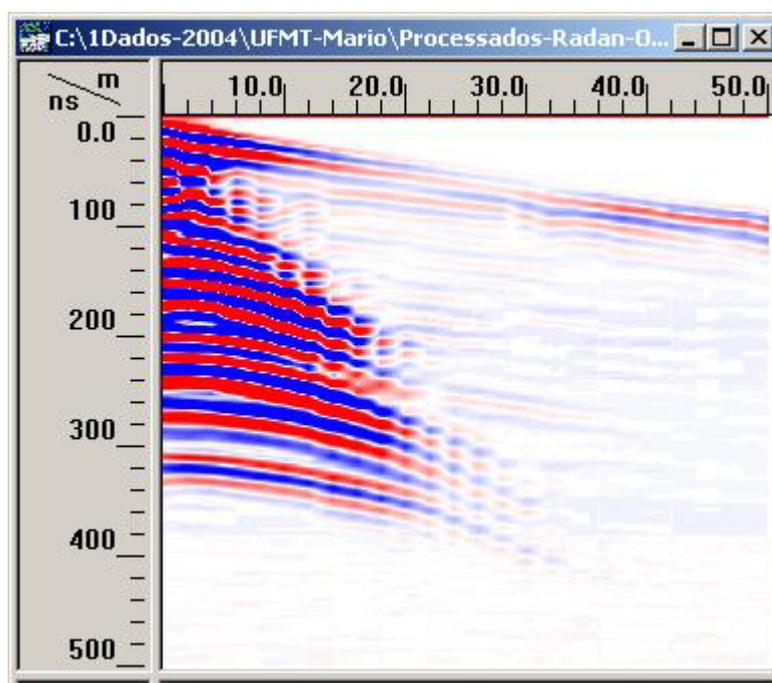


Figura 35 – Visualização em *Linescan* do perfil de GPR do tipo CMP (Common Mid Point), com antenas de 50MHz.

A partir da análise de *Semblance*(Figura 36), o diagrama de velocidades foi construído com as amplitudes dos traços empilhados e revelou uma velocidade de 0,13 m/ns.

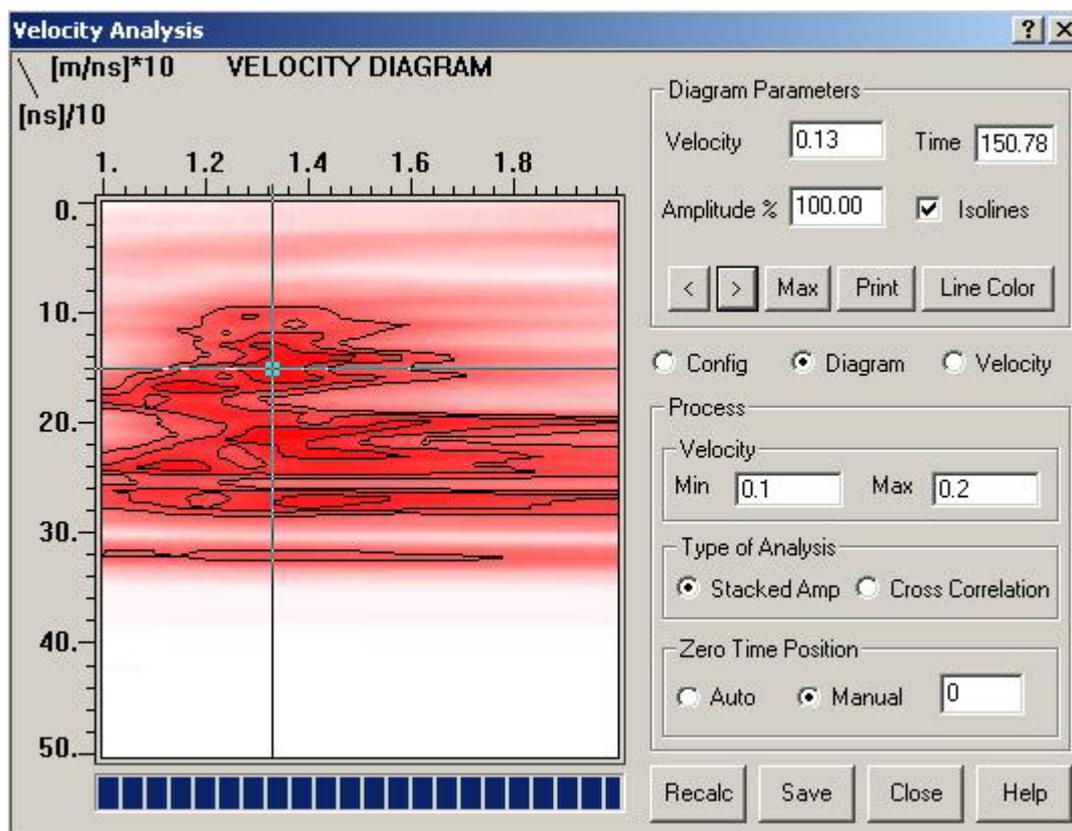


Figura 36 – Visualização do diagrama de velocidades resultante da análise de *Semblance* do perfil CMP (Common Mid Point) da Figura 35, com antenas de 50MHz.

Após a aquisição dos perfis de caminhamento com afastamento constante com as antenas de 50 MHz e 200MHz, os dados foram convertidos para o formato adequado para processamento. Os traços foram editados para corrigir ou eliminar os traços com problemas na aquisição. A seguir foi realizado o ajuste do tempo zero e a análise espectral para verificar a faixa de frequência dos sinais adquiridos, e definir as frequências de corte para o filtro passa banda. As frequências determinadas para a filtragem foram: $F1= 25$ MHz, $F2= 100$ MHz, para o perfil obtido com antenas de 50MHz. O filtro passa banda foi aplicada para eliminar os ruídos de baixa e alta frequência Para melhorar a visualização dos traços com menor amplitude, foi aplicada ganho linear no sinal por intervalos (*range gain*). Por fim, os dados de GPR foram plotados em função da profundidade, utilizando a velocidade obtida na CMP. Nas Figuras 37 e 38 os perfis de GPR são visualizados no modo *Linescan*, exibindo um perfil resultante da aquisição com antenas de 50MHz e outro perfil adquirido

com as antenas de 200MHz. As faixas brancas na Figura 37 correspondem aos locais onde foram eliminados os traços que estavam com problemas.

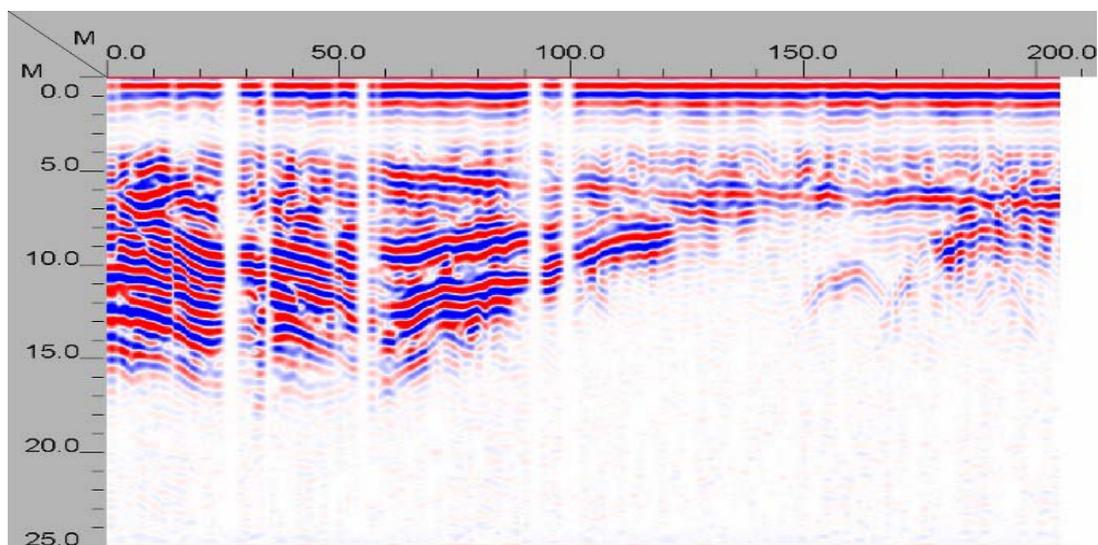


Figura 37 – Visualização *Linescan* do perfil de GPR, com antenas de 50MHz, com a escala vertical em profundidade.

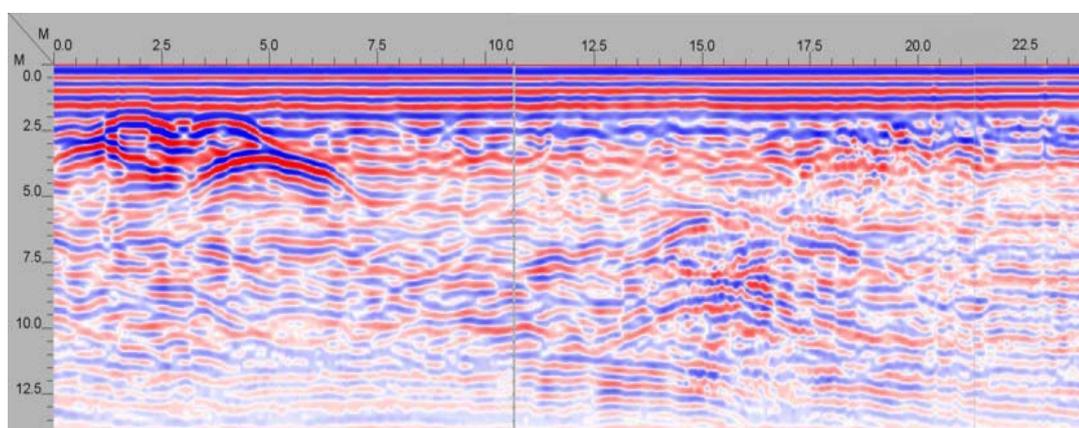


Figura 38 - Visualização *Linescan* do perfil de GPR, com Antenas de 200MHz, com a escala vertical em profundidade.

As Figuras 39 e 40 apresentam os mesmos perfis de GPR com antenas de 50 e 200 MHz, respectivamente, corrigidos topograficamente.

Na Figura 39, observa-se um primeiro conjunto de sinais fortes registrados da superfície até 2,0 m de profundidade ao longo de todo perfil. Estes sinais

correspondem às chegadas das ondas que se propagam diretamente pelo ar e as ondas que se propagam diretamente pelo solo, da antena transmissora até a receptora. Entre 2,0 e 4,0 m de profundidade, há uma região onde os sinais têm amplitudes muito pequenas e significa uma região sem reflexões, com coeficiente de reflexão muito baixa. É uma camada homogênea e interpretada a partir dos furos de sondagens a trado como sendo a camada de solo de textura areno-argilosa a argilo-arenosa com presença de plintitas, poderia corresponder aos horizontes BW1 e BW2 e neste caso sem plintitas. Abaixo de 4,0 m de profundidade, observam-se sinais fortes que indicam uma mudança nas propriedades eletromagnéticas, o que provoca reflexões marcantes. A espessura desta camada é variável, com espessuras entre 11 e 13 m na primeira metade do perfil e reduz para 8 m na posição 100m, reduzindo gradativamente para 5 m na posição 170 m. A partir deste ponto a espessura aumenta novamente para 7 m e mantendo-se até o final do perfil. Esta camada é interpretada como pertencente à Formação Cachoeirinha devido à presença de concreções cimentadas por óxidos de ferro, que favorecem as fortes reflexões. Abaixo desta camada os sinais de GPR desaparecem indicando a mudança de propriedade física. Esta camada foi associada à Formação Cambambe, constituída de arenitos argilosos, microconglomeráticos a conglomeráticos, interdigitada por lentes de conglomerados, brechas intraformacionais, arenitos fino a médio e silcretes, sem presença de óxido de ferro e situa-se logo abaixo da Formação Cachoeirinha. Neste perfil é possível identificar o topo do lençol freático, indicado em azul na Figura 39. Observa-se que a parte das rochas da Formação Cachoeirinha abaixo do topo do lençol freático apresenta reflexões mais fortes. À parte acima deste nível apresentam reflexões mais fracas pela ausência de água.

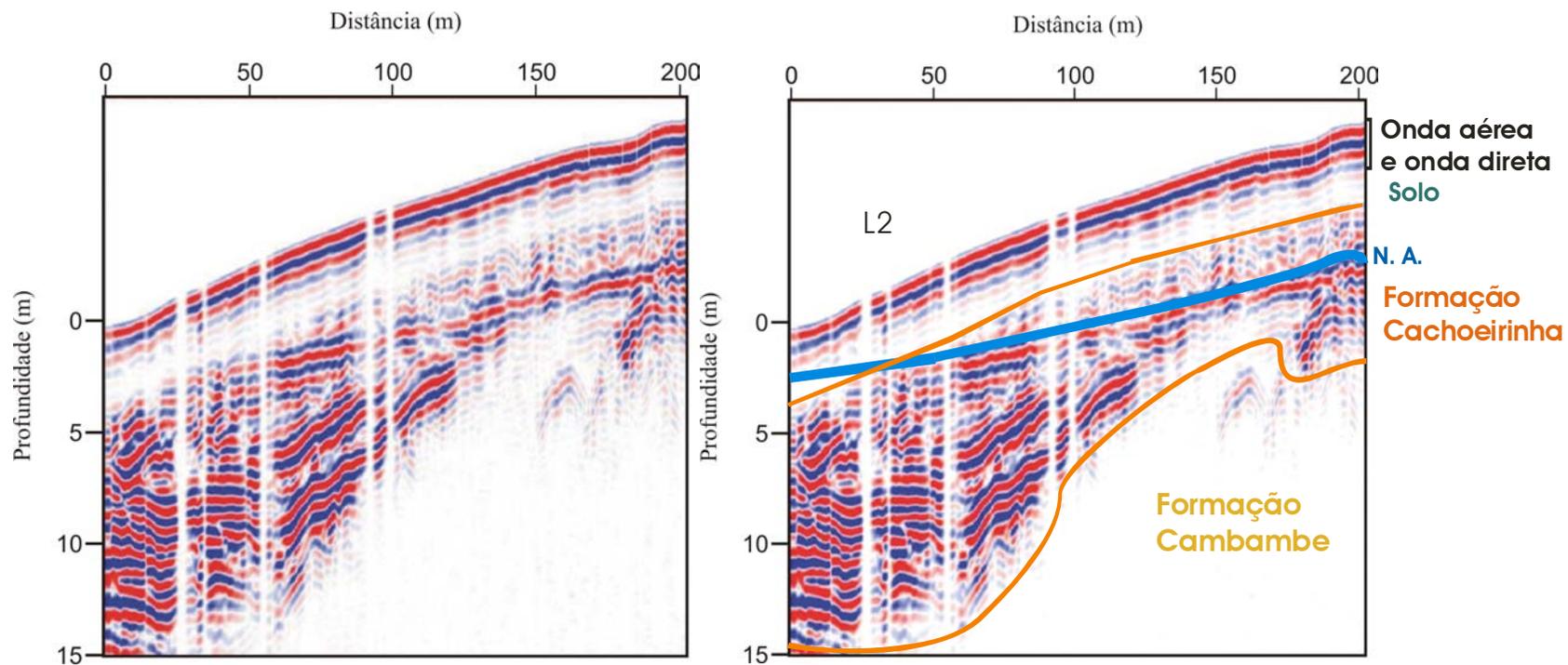


Figura 39 - Perfil de GPR, com Antenas de 50MHz. à direita o perfil interpretado. A linha em azul (NA) indica o topo do lençol freático. A linha marrom delimita o topo e a base da Formação Cachoeirinha. O retângulo L2 corresponde ao local do perfil de GPR com antenas de 200 MHz.

Na Figura 40, está o perfil de GPR com antenas de 200 MHz sem interpretação na parte superior e interpretado na parte inferior. Os sinais mais fortes da superfície até a profundidade de 1,5 m correspondem às chegadas das ondas aéreas e as ondas diretas no solo (*ground wave*). Abaixo desta camada aparece uma região até 4,0 m de profundidade que associamos ao solo argilo-arenoso a areno-argiloso com presença de plintitas, conforme a descrição das sondagens a trado (Figura 24). A camada logo abaixo é correlacionável à Formação Cachoeirinha, como interpretado no perfil com antenas de 50 MHz, onde aparecem refletores irregulares devido à presença de concreções de óxido de ferro. No início, entre as posições 21 e 27 m, ao longo do perfil e abaixo de 1,5 m até 4,0 m, observam-se um conjunto de refletores fortes e com concavidade para baixo sugerindo presença de blocos de concreções cimentadas por óxido de ferro. Refletores semelhantes aparecem também entre as posições 35 a 40 m na profundidade, abaixo de 5 m. O topo do lençol freático não é claro nesta imagem.

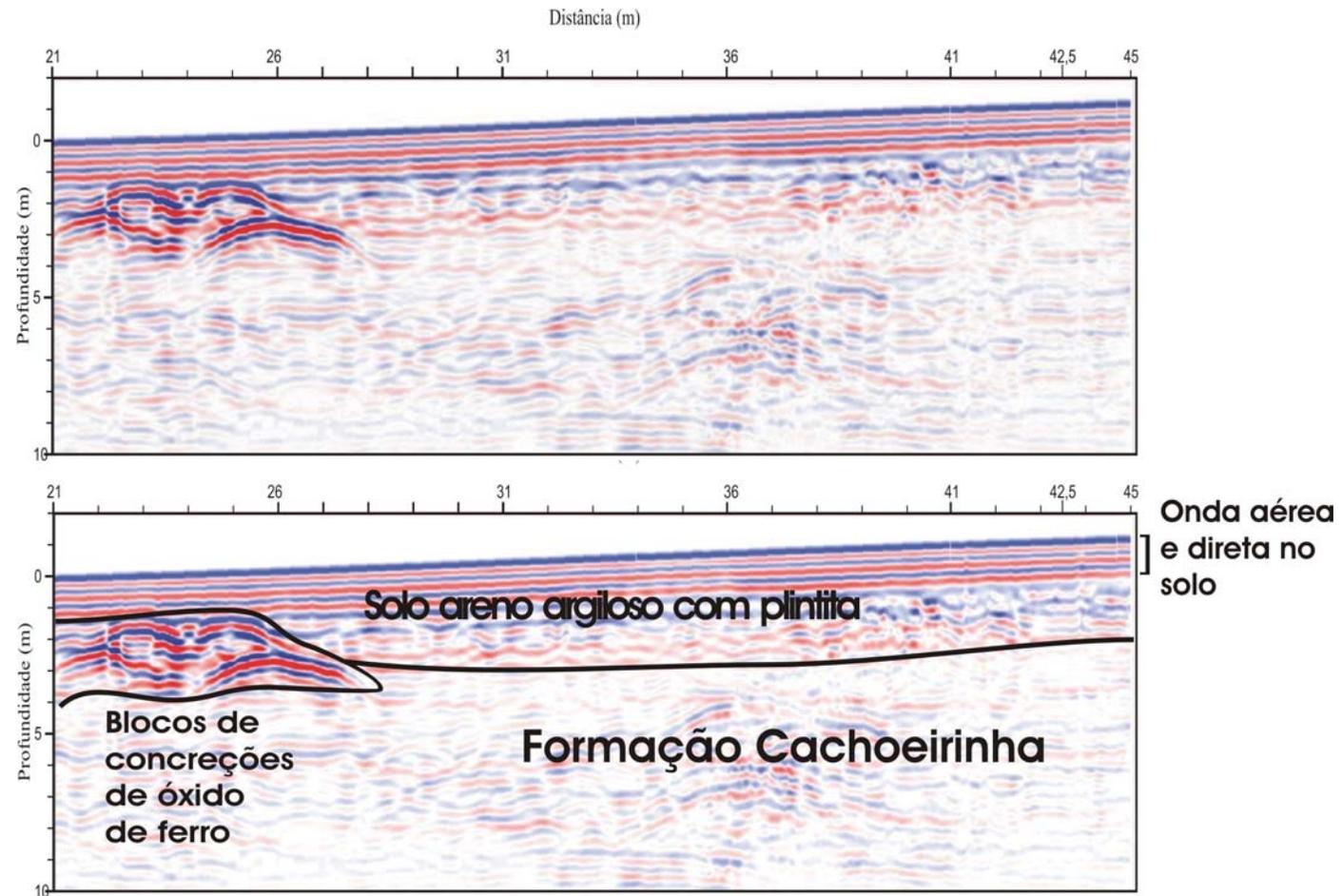


Figura 40 - Perfil de GPR, com Antenas de 200MHz. Abaixo o perfil interpretado.

Para comparação dos resultados dos dois métodos elaborou-se a Figuras 41 que mostra a perfil integrado do trecho inicial da vertente, de 0 a 200 m, com o modelo de camadas da SEV1 e da SEV2 sobreposto ao perfil de GPR adquirido com antenas de 50 MHz. Estão indicados também na figura os locais das sondagens a trado (ST) e os respectivos horizontes pedológicos e geológicos. As resistividades das camadas das SEVs estão agrupadas como na Tabela 6 (pág. 56) seguindo as cores ali estabelecidas.

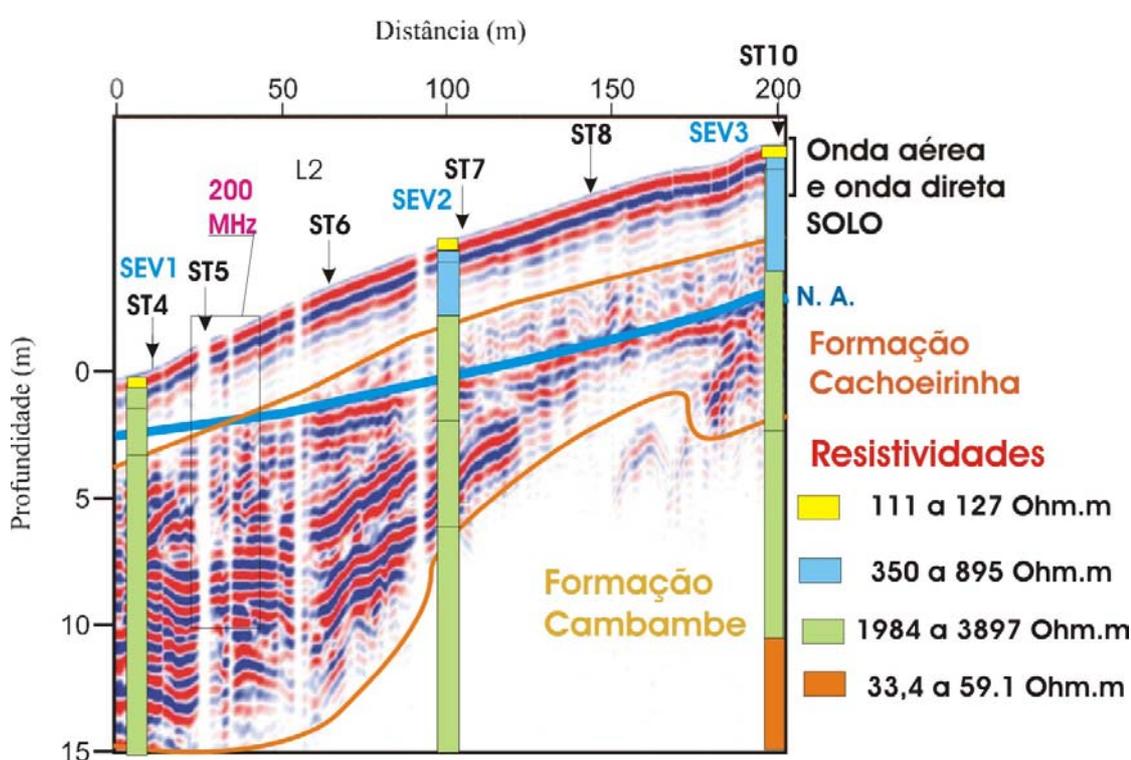


Figura 41 - Integração das SEV1 e SEV2 com o Perfil de GPR, com antenas de 50MHz. As localizações das Sondagens a Trado (ST) e a localização do perfil de GPR com antenas de 200 MHz.

Na Figura 42 estão reunidas as cinco SEVs com os modelos de camadas e as respectivas faixas de resistividades como classificadas na Tabela 6, corrigidas da topografia da vertente. Observa-se nesta figura a ultima camada de baixa resistividade inicia em profundidades maiores do que 19,4 m . Comparando com a figura anterior observa-se que a camada de alta resistividade corresponde parte Formação

Cachoeirinha e parte a Formação Cambambe. Analisando somente pelos valores de resistividades não foi possível descrever estas duas formações. A alta resistividade desta camada, não esta de acordo com o alto conteúdo de oxido de ferro na Formação Cachoeirinha, mas este fato permitiu separar a Formação Cambambe da Formação Cachoeirinha. Uma possível explicação para esta alta resistividade na Formação Cachoeirinha e que os conglomerados cimentados com oxido de ferro, formam blocos eletricamente isolados um do outro não permitindo a presença de correntes de condução entre os blocos.

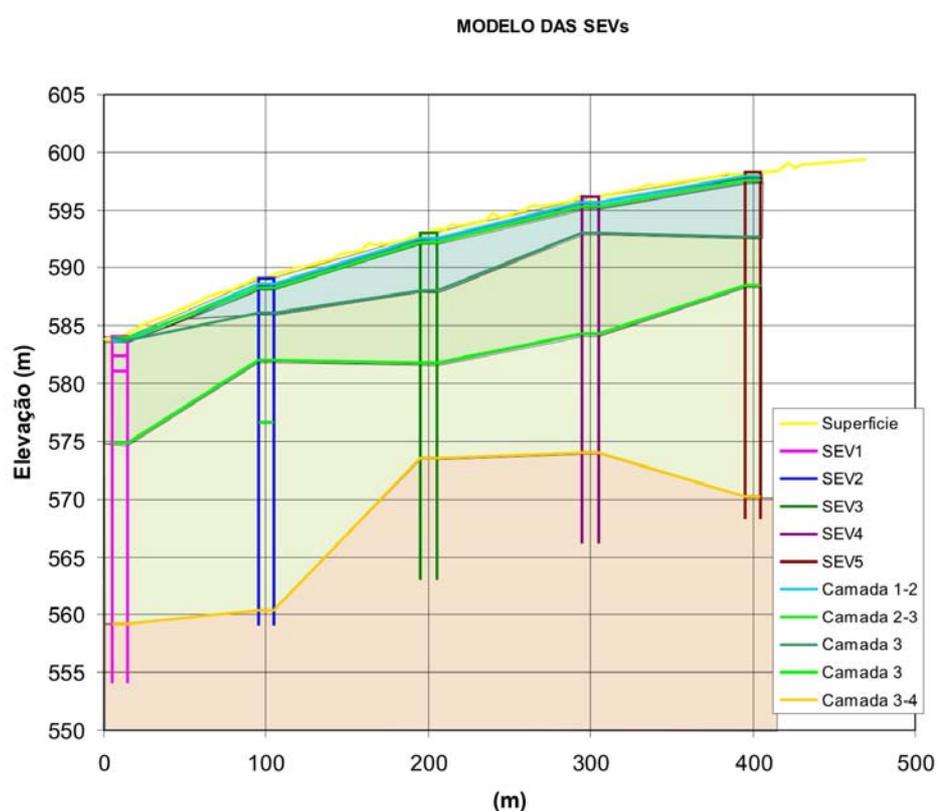


Figura 42 – Estrutura Geoeletrica da vertente a partir dos modelos de camadas das cinco SEVs

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Aplicou-se métodos geofísicos de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Radar de Penetração no Solo (GPR) ao longo de uma vertente representativa, da micro bacia do Córrego Chico Nunes, para subsidiar a caracterização da cobertura pedológica e respectivo funcionamento hídrico.

Para esta caracterização foram realizadas cinco SEVs e dois perfis de GPR ao longo da mesma linha subindo a vertente.

A análise morfológica das curvas logarítmicas de resistividade em função da separação dos eletrodos de corrente ($AB/2$) permitiu a caracterização um sistema do tipo K ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$) de três camadas para a SEV1 e do tipo AK ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$) de quatro camadas para as SEV2, SEV3, SEV4 e SEV5.

A partir destas curvas das SEVs foram calculados os modelos de camadas eletrorrestivas para cada SEV. Estes modelos foram interpretados conjuntamente e permitiu definir uma primeira camada com espessura inferior a 0,40 m composta pelo horizonte Ap, com textura argilo-arenosa, contendo matéria orgânica, com exceção na SEV1 onde a textura era areno-argilosa, com valores de resistividade entre 111 Ohm.m e 167 Ohm.m, provavelmente em função do aumento da porcentagem de areia e diminuição da umidade.

Nas SEVs 2, 3, 4 e 5 os valores de resistividades permitiram agrupar as 2^{as} e a 3^{as} camadas em uma camada de resistividade intermediária, entre 335 Ohm.m e 895 Ohm.m. A espessura destas duas camadas varia entre 2,55 m e atinge 5,46 m. Este pacote foi associado aos horizontes BW1 e BW2 com textura argilo-arenosa a areno-argilosa, encontrado nos furos de sondagem a trado.

Na SEV1, as camadas 2, 3, 4 e 5 tem alta resistividade, assim como as camadas 3, 4 e 5 da SEV2, camadas 4 e 5 das SEV3, SEV4 e SEV5. As resistividades nestas camadas variam entre 1984 Ohm.m até 4 452 Ohm.m. A profundidade mínima deste pacote é 1,3 m na SEV1 e a máxima profundidade é 28,4 m. Este pacote de alta resistividade foi associado ao horizonte C e às rochas da Formação Cachoeirinha que aparece logo abaixo da camada de Latossolo na área. As presenças de plintitas no solo indicam que as rochas abaixo devem conter óxido de ferro, encontrado na Formação Cachoeirinha.

A última camada, possui baixa resistividade (menor que 59,1 Ohm.m) indicando a presença de material saturado sendo interpretado como Formação Cambambe, pois esta é constituída de arenitos argilosos microconglomeráticos a conglomeráticos, interdigitada por lentes de conglomerados, brechas intraformacionais, arenitos fino a médio e silcretos, com água preenchendo os poros que justificam a baixa resistividade.

Foi também obtida imagem da subsuperfície com o GPR, ao longo de um trecho da vertente, começando na base e estendendo-se por 200 m em direção ao topo da vertente. Para obter as profundidades das camadas refletoras, a análise de *semblance* da sondagem de velocidades CMP, forneceu uma velocidade da onda eletromagnética na primeira camada de solo/rochas de 0,13 m/ns. Com esta velocidade foram determinadas as profundidades das camadas refletoras que mostraram uma camada de Latossolo com 4 m de espessura em média, sobreposta ao horizonte C e as rochas da Formação Cachoeirinha com espessura entre 10 m e 13 m nos primeiros 100 m e diminui para 5 m, mostrando a continuidade das camadas. Logo abaixo está a Formação Cambambe que tem uma composição mais silicática e ausência de óxido de ferro e desta forma o sinal do GPR não sofre reflexões significativas. Foi possível identificar ainda, na imagem de GPR, o topo do lençol freático, que no início do perfil estava a 2,65m de profundidade e no final do perfil estava a 6,5 m de profundidade.

Uma integração do modelo geoeétrico das SEVs, com as imagens obtidas no GPR, permitiu elaborar um modelo geofísico/geológico integrado da topossequência. Permitiu identificar ainda a profundidade da zona saturada dentro da Formação Cambambe. A utilização dessas duas metodologias de investigação permitiu elaborar um modelo de estrutura de solo/rocha até 30 m de profundidade.

A combinação das profundidades dos refletores observados nas imagens de GPR com as profundidades das camadas nos modelos de SEVs, permitiu uma modelagem interativa mais consistente para as espessuras e resistividades das camadas, pois em geral uma mudança na resistividade deve estar acompanhada de mudança na constante dielétrica que favorece a reflexão. Entretanto verificou-se que a resposta do GPR permitiu uma melhor separação das formações Cambambe e Cachoeirinha.

A alta resistividade da Formação Cachoeirinha deve ser objeto de novas pesquisas para permitir uma interpretação mais consistente nos levantamentos geelétricos, pois esta formação é encontrada em varias regiões do estado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS

ABNT, NBR 7117 1981 – **Medição da resistividade do solo pelo método dos quatros pontos (Wenner)** – Rio de Janeiro, 1981.

AL HAGREY, S.A. & MÜLLER, C. GPR study of pore water content and salinity in sand. **In: Geophysical Prospecting** v.48, p.63-85. 2000.

ANNAN, A. P. & DAVIS, J. L., **Radar range analysis for geological materials**. Mississauga: Sensors & Software, Inc., (Internal Report PEMD #10), p.4, 1977.

ANNAN, A. P. Ground penetrating radar Workshop Notes Sensors and Software, **Inc., Mississauga, ON, Canada**, pp. 130, 1992.

ANNAN, A. P., COSWAY, S. W. **Ground penetrating radar survey design. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP' 92)**, Oakbrook, IL, USA, Apr. p.26-29, 329-352, 1992.

ARIZAGO **Sistema Pedológico Latossolo-argilossolo e seu Comportamento Físico Hídrico em Mamborê, PR**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo-SP, 160p. 2000.

ARANHA, P. R. A., SOBREIRA, F. G. & AUGUSTIN, C. H. R. R. **Aplicações do Geo - radar no estudo geomorfológico em Gouveia Serra do Espinhaço, MG**. Departamento de Geologia – IGC/UFMG. 2003.

BARKER. R. D., **Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays**. *Geophysics*, 54, p.1031-1037. 1989.

BARROS, A. M.; SILVA, R. H.; CARDOSO, O. R. F. A.; FREIRE, F. S.; SOUZA JR.; J. J.; RIVETTI, M.; LUZ, D. S.; PALMEIRA, R. C. B.; TASSINARI, C. C. G., *Geologia*. **In: Projeto Radambrasil, Folha SD. 21 (Cuiabá)**, Rio de Janeiro, RJ, v. 26, p.25-256, 1982.

BHATTACHARYA, P.K. & PATRA, H.P. **Direct Current Geoelectric Sounding**. Elsevier Publishing Company. New York. 135p. 1968.

BOBACHEV, A. A.; MODIN, I.N.; PERVAGO, E. V.; SHEVNIN, V. A., 1999. All rights reserved. **IPI2Win – Programs' set for 1D SEV data interpretation**. Moscou State University, Geological Faculty, Department of Geophysics. www.Geol.msu.ru/deps/geophys/rec_labe.htm. IPI min. doc, 181kb was developed using Delphi 5 by the Borland Int. # HDC1350WW10180, acessado em 03/10/2001.

BORGES, W. R. **Investigações Geofísicas Na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade.** Dissertação de Mestrado, apresentado ao Departamento de Geofísica, Universidade de São Paulo – USP. 2002.

BORGES, W. R. & PORSANI, J.L.,

BRAGA, A C. O. **Métodos Geométricos Aplicados - Módulo Hidrogeologia. Rio Claro:** Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista., p. 91, 2002.

DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P., Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v.37, p. 531 – 551, 1989.

DUKE, S. Calibration of Ground Penetrating Radar and Calculation of Attenuation and Dielectric Permittivity Versus Depth. M. Sc. Thesis – Colorado School of Mines. 236 p., 1990.

DORES, E. F. G. C. – **Contaminação por herbicidas das águas usadas para consumo humano Primavera do Leste (MT).** Curso de Pós Graduação em Saúde Coletiva da Universidade Federal de Mato Grosso, Exame de Qualificação. Cuiabá-MT, 2000.

FAY, E. F.; SILVA, C. M. M. S.; MELO I. S. Degradação abióticas de xenobióticos. In: MELO, I. S.; AZEVEDO, J. L. (eds.) **Microbiologia Ambiental.** Jaguariúna: **EMBRAPA.** Cap. 4, p.125-140, 1997.

FIGUEIRÓLA, J. C. Tratado de Geofísica Aplicada. **2ª Edição. Madrid (Espana),** 1974.

GANDOLFO, O. C. B. **Aplicações de GPR no Brasil: Potencialidade e limitações a partir de casos estudados. Rio Claro - SP.** IGCE/UNESP, 2000.

GSSI 3D Quick Draw for **RADAN 5.0. User's Manual.** Geophysical Survey Systems, Inc., North Salem, NH, 2003, 67p.

GONÇALVES, K. C. O. **Estudo morfopedológico aplicado à interpretação do funcionamento hídrico de vertentes em micro-bacia representativa da Chapada dos Guimarães, no município de Primavera do Leste (MT) Cuiabá.** Monografia (Monografia de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Geologia da Universidade Federal de Mato Grosso. 104p. 2003.

HUISMAN, J.A, J.J.J.C. SNEPVANGERS, W. BOUTEN and G.B.M. HEUVELINK Monitoring Temporal Development of Spatial Soil Water Content Variation, Comparison of Ground Penetrating Radar and Time Domain Reflectometry **Vadose Zone Journal**, 2:519-529, 2003.

McNEILL, J. D. Electrical conductivity of soils and rocks. **Geonics Limited, Technical Note TN-5**, 1980. 22p.

MOURA, I. B. & VECCHIATO, A. B. **Métodos Geofísicos aplicados a Caracterização de Vertentes como Subsídio a Conservação Ambiental**. Dissertação Mestrado em Ecologia e Conservação da Biodiversidade - Fundação Universidade Federal de Mato Grosso. 2003.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T. & CAMARGO, M. N. **Classes Gerais de Solos do Brasil**. UNESP – CAMPOS DE JABOTICABAL. -FUNEP-Jaboticabal – SP, 1992; 201 pg.

OLHOEFT, G. R. Application and limitations of ground penetrating radar. **In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING AND EXPOSITION OF SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS**, 54, Atlanta. *Expanded abstracts ...*, Atlanta: SEGG, 1984, p. 147-148.

OLHOEFT, G. R. Applications and limitations of ground penetrating radar: **In Expanded abstracts, 54th Ann.Int.Meeting and Expo.of the Soc.of Explor.Geophys, Atlanta**, 1984, p.147-148.

ORELLANA, E. *Prospeccion geoelectrica en corriente continua*. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips 1972. 523p.

PORSANI, J.L., **Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta Metodológica de Emprego em Estudos Geológicos – Geotécnicos nas Regiões de Rio Claro e Descalvado – SP**. Tese de Doutorado em Geociência e Meio Ambiente (Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE/UNESP). Campos de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista - Rio Claro -SP. 1999.

PORSANI, J.L., & MALAGUTTI, W. F. **Emprego do GPR para Estudos Geológicos na Mineração Jundu, Descalvado - SP**. (Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE/UNESP). Universidade de São Paulo (IAG/USP), São Paulo-SP. 2000.

PORSANI, J. L. **Métodos GPR: Aplicações em Geologia, Geotécnica, Meio Ambiente e Planejamento Urbano**. V Escola de Verão, Universidade de São Paulo (IAG/USP), São Paulo-SP. 2000.

PORSANI, J. L., FILHO M. W., ELIS, R. V., SHIMELES, F., DOURADO, C.J., MOURA, P.H. **The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil**, Universidade de São Paulo (IAG/USP). São Paulo-SP. 2003.

PORSANI, J. L., FILHO M. W., ELIS, R. V., SHIMELES, F., DOURADO, C.J., MOURA, P.H. **Geophysical investigations for the characterization of fractured**

rock aquifers in Itu, SE Brazil. Universidade de São Paulo (IAG/USP). São Paulo-SP. 2004.

PORSANI, J.L. & HIODO, F.Y. Geophysical investigations for the characterization of fractured rock aquifers in Itu, SE Brazil. **Journal of Applied Geophysics** 57, p.119-128, 2005.

PRODEAGRO Manual de Gestão Ambiental de Obras Rodoviárias em Mato Grosso, Cuiabá-MT. 1997.

REYNOLDS, J.M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.** 1.ed. Chichester, England: John Wiley & Sons, 795 p. 1997.

ROSS, J.L. S.; SANTOS, L. M. Geomorfologia. Projeto **RADAMBRASIL**, In: Brasil, M.M.E. Folha SD. 21 Cuiabá, 1982, p.193-256. v. 26.

ROY, A. & APPARAO, A. **Depth of investigation in direct current methods.** **Geophysics**, vol. 36(5), 1971, 943-959.

RAMAC – GPR. System description, startup of your RAMAC – GPR, software manual. Skolgatan: **MALA GEOSCIENCE**, 88P. (TERNAL Report). Available: <http://www.malags.se>. 1997.

SALOMÃO, F.X. T, **Processos Erosivos Lineares em Bauru (SP): Regionalização Cartográfica Aplicada ao Controle Preventivo Urbano e Rural.** Tese de Doutorado Departamento de Geografia FFLCH-USP, São Paulo – SP. 1994.

SHARMA P. V., **Environmental and Engineering Geophysics.** Cambridge University Press, New York – USA. 1997.

SHIRAIWA, S., MOURA, I. B., PORSANI, J.L. O uso do GPR para estudo de estruturas pedológicas de uma vertente relacionada com uma Vossoroça na Alta Bacia do Rio Araguaia – GO. Instituto de Ciências Exatas e da Terra – UFMT. **Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG – USP).** 2003.

SCHRECK, P. Environmental impact of uncontrolled waste disposal in mining and industrial áreas in Central Germany. **In: Environmental Geology** 35 (1), p.66-72, julho/1998.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. **Applied geophysics**, Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 1990, 770p.

TIKHONOV, A. N., & ARSENIN, V.Y. **Solutions of Ill-Posed Problems.** Winston, Washington: John Wiley and Sons. 1977.

TRAVASSOS, J. M. Caracterização da subsuperfície rasa utilizando o método GPR. **Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Campos de Rio Claro-SP.** 2002.

YODER R. E., FREELAND R. S., AMMONS J. T., LEROY L. L. **Mapping agricultural fields with GPR e EMI to identify offsite movement of agrochemicals**. Department of Agricultural and Biosystems Engineering, the University of Tennessee, Department of Plant and Soil Sciences, the University of Tennessee, Knoxville-USA. 2001.

YILMAZ, O. **Seismic Data Processing**. Society of Exploration Geophysics Press, Tulsa. 1987.

WESKA, R.K., BITTENCOURT ROSA, D. , PISANI, J.R.T., ARRAIS, J.C. de P., MACIEL, M.A.C., RIBEIRO, J.M., KATO, S.L.R., ARAÚJO, S.A. de & ROSESTOLATO FILHO, A. - **A Estratigrafia, a Evolução Tectônica e o Diamante do Grupo Bauru da Região de Poxoréu, MT, Brasil**, *In: Simpósio Brasileiro de Geologia do Diamante, 1º*, Cuiabá, MT, Anais...Cuiabá, Ed. UFMT - Gráfica Universitária. 1993, p.208-228.

6.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS

ALLEONI, L. R. F. Principais atributos dos solos relacionados à dinâmica de defensivos. **In: Simpósio sobre a dinâmica de defensivos agrícolas no solo – Aspectos práticos e ambientais.** Piracicaba: ESALQ, p. 6-22, novembro de 2002.

ALLEN, C.T & PLUMB, R.G. Seventh International Conference on GPR, University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA 27-30 may 1988. Special Issue – GPR 98, **Journal Applied Geophysics**. 2000.

ANNAN, A. P. & DAVIS, J. L. Impulse radar soundings **In permafrost. Radio Science**, v.11, p.383-394, 1976.

ANNAN, A. P. Radar CDP and WARR soundings: principles & interpretation. Mississauga: Sensors & Software, Inc., (**Internal Report PEMD #23**), p.11, 1985.

ANNAN, A. P. & DAVIS, J. L., Ground penetrating radar performance predictions. **In. WORKSHOP ON GROUND PENETRATING RADAR**, Ontario: Geological Survey of Canada, 1988.paper 90-4, p.5-13.

ANNAN, A. P., COSWAY, S. W., REDMAN, J. D. Water table detection with ground penetrating radar. **In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICAL**, 61, Houston. *Expanded Abstracts...*, Houston: SEG, p. 494-496, 1991. Available: <http://www.sensoft.on.ca>.

ANNAN, A. P. Transmission dispersion and GPR. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v.0, n.2, p.125-136, 1996.

AMARAL, D. L. & FONZAR, B. C. Vegetação. **Projeto RADAMBRASIL**, In: Brasil, M.M.E. Folha SD. 21 Cuiabá, v. 26, p.401-452, 1982.

AZEVEDO, A. A. & ALBUQUERQUE FILHO, J.L. Águas Subterrâneas. In: OLIVEIRA A M.S BRITO, S.N. A (Eds) **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, Cap 8, p 111-130. 1998.

BARCELÓ, D. & HENNION, M.C. Trace determination of pesticides and their degradation products in water. **Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry** v.19, Amsterdam: Elsevier Science B. V. P.1-94. 1997.

BARBALHO, M. G. da S. **Morfopedologia Aplicada ao Diagnóstico e Diretrizes para o controle dos Processos erosivos Lineares na Alta Bacia do Rio Araguaia (GO/MT)**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, 140p. 2002.

BERES, M., HAENI, F. P. **Application of ground penetrating radar methods in hidrogeologic studies**. Ground Water, 1991, v.29, n.3, p.375-386.

BERTIN, J. Some aspects of induced polarization (time domain). **Geophysical Prospecting**, 1968, v. 16, p.401-426.

BHATTACHARYA, B.; SARKAR, S.K. e MUKHERJEE, N. Organochlorine pesticide residues in sediments of a tropical mangrove estuary, India: **implications for monitoring Environment internacional** v. 29, p.587-592, 2003.

BIRKELAND, P.W. **Pedology, weathering, and geomorfological research.** Boulder: Departament of Geological Sciences, University of Colorado, p.285, 1974.

BOULET, R. Uma evolução recente da Pedologia e suas implicações no conhecimento da Gênese do Relevo. **In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**, 3, Belo Horizonte: ABEQUA. 1992.

BORNER, F.D. SCHOPPER, J.R; WELLER, A. Evaluation of transport and storage properties in the soil and groundwater zone from induced polarization measurements. **Geophysical Prospecting**. v. 44, n^o 4, p. 583-601, 1996.

BRAGA, A C. O. **Métodos Geométricos Aplicados na Caracterização Geológica e Geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP.** Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual paulista. p. 169,1997.

BRAGA, A C.O. MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J.C.; KIANG, C.H. “Correlation of electrical resistivity and induced polarization data with geotechnical survey standard penetration test (SPT) measurements” **Journal of Environmental and engineering Geophysics (JEEG) – The Environmental and Engineering Geophysical Society (EEGS)**. v. 4, n. 2, p.35-42, 1998.

BRAGA, A C. O. MALAGUTTI FILHO, W; DOURADO J.C; ELIS, V.R. **“Métodos Geométricos Aplicados nos Estudos do lençol Freático em Área de Disposição de Resíduos Industriais”**. 6th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Sociedade Brasileira de geofísica – SBGf, Society of Exploration Geophysics – SEG, European, 1999.

BRASIL. Ministério das Minas de Energia. **PROJETO RADAM BRASIL** Folha SD. 21. Cuiabá. 1982, p.67-88, p.109-128, v.26.

BROGGI, JR. J. **Morfopedologia Aplicada ao Município de Tangará da Serra (MT): Subsídios ao planejamento da Ocupação do Solo.** Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT. p. 60, 2002.

CARBO, L. **Avaliação do Comportamento de Pesticidas em Solo de Lavouras de Algodão na Região de Primavera do Leste, Mato Grosso.** (Dissertação Mestrado em Saúde e Ambiente). Universidade Federal de Mato Grosso-UFMT, 137p. , 2003.

CASTRO, S. S. & SALOMÃO, F.X.T. Compartimentação Morfopedologica e suas Aplicação: Considerações metodológicas. **In: GEOUSP, Revista do Departamento de Geografia – FFLCH-USP**, N^o 7, São Paulo, Humanistas. p. 21-37, 1997.

CASTANY, G. *Traité pratique des eaux souterraines.* Paris, S. A Dunod, 657p., 1963.

CASTANY, G. **Prospection et exploration des eaux souterraines**. Paris. S.A. Dunod, 660p. , 1868.

CHANZY, A. TARUSSOV, A., BONN, F., **Soil water content determination using digital ground-penetrating radar**. Soil Sci. Am. J. 60 (5), p.1318 – 1326, 1996.

CLEARLY, R.W. & MILLER, D.W. Aspectos Fundamentais e Monitoramento de Poluição de Água Subterrânea, Fortaleza, CE, Anais 2: p.313-330, 1984.

COLLINS, M. E., DOOLITTLE, J. A., ROURK, R. V. **Mapping depth to bedrock on a glaciated landscape with ground-penetrating radar**. Soil Sci. Am. J. 53 (6), p. 1806-1812, 1989.

COSTA, M. S. **Estudos da Alteração da Qualidade Natural da Água de Subsuperfície em Primavera do Leste – MT**. Dissertação de Mestrado, Biociências da Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT. 2000.

COSTA, R; WESKA, R.K. Mapeamento Geológico de Parte do Cretáceo Superior, Formação Paredão Grande (Grupo Bauru) – Dom Aquino-MT. **In: Trabalho de Iniciação Científica CNPq**, p. 65, 2001.

CUTRIM, A. O. **Estudos hidrológicos na Bacia do Paraná, no Município de Rondonópolis**. Tese de Doutorado, Instituto de Biociências, UFMT, Cuiabá – MT, 204p., 1999.

CUSTÓDIO, E & LLAMAS, M.R. **Hidrogeologia Subterrânea, Barcelona**, Ediciones Omega, S. A. L1, p.1157, 1976.

DANIELS, J. J., ROBERTS, R. & VENDL, M. A. Ground Penetrating Radar for the Detection of liquid contaminants, **Journal of Applied Geophysics**. 1995.

DANIELS, D.J. Surface Penetrating Radar. **The Institution of electrical Engineers**, 1996.

DAVIS, J. L., ANNAN, A. P. Application of ground penetrating radar to mining, groundwater and geotechnical projects: Selected case histories. **In: WORKSHOP ON GROUND PROBING RADAR**, Ontario: Geological Survey of Canada, p.4-90, p.49-55. 1988.

DALAN, R.A. Defining archaeological features with electromagnetic at the Cahokia Mounds State Historic Site. **Geophysics** 56 (8), 1280-1287, 1991.

DAVINO, A., Importância do método de eletrorrestividade na determinação da natureza do manto de decomposição de rochas cristalinas. **In: Boletim da sociedade Brasileira de Geologia – SBG São Paulo-SP**, v. 19, p. 933 – 935, 1970.

DAVIS, S.N & DE WIEST, R.J.M. **Hidrogeology**. New York, John Wiley & Sons, Inc – 453p. 1961.

DORES, E. F. G. C.; DE-LAMONICA-FREIRE, E.M. **Contaminação do ambiente aquático por pesticidas: Vias de contaminação e dinâmica dos pesticidas no ambiente aquático**. Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente, v.9, p.1-18, 1999.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - **EMBRAPA**. – Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 2ª ed. 212p., 1997a.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – **EMBRAPA**. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 4ª aproximação.. 169p. 1997b.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – **EMBRAPA** Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 412p., 1999.

ELIS, V.R. **A Aplicação de Geofísica para Análise do Meio Físico. Importância para elaboração de Mapeamento Geotécnico**. Dissertação de Mestrado, Rio Claro-SP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, 120p. (inédita). 1993.

ELIS, V.R. **Avaliação da aplicabilidade de Métodos Elétricos de Prospecção Geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos**. Tese de Doutorado, Rio Claro-SP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Campos Rio Claro –SP.1998.

ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. Caminhamento elétrico dipolo-dipolo - uma técnica eficiente na investigação de depósitos de resíduos. **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, Vol. I pp.39-48**. 1996.

FETTER, C. W. Applied Hydrogeology. University of Wisconsin, Oshkosh, third edition. **Editora Prentice hall**, inc. ISBN 0-02-336490-4, 1994. 691p.

FISHER, E., McMECHAN, G. A., MANNAN, A. P., Acquisition and processing of wide aperture ground penetrating radar data. **Geophysics**, v.57, n.3, p.495-504, 1992^a.

FOSTER, S.S.D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. **Proc. Int. Conf. Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants**. Noordwijk, The Netherlands, March-April, 1987.

FOSTER, S.S.D. &HIRATA, R.C. Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas - **método de reconocimiento basado en datos existentes** CEPIS-OPS, Lima, Perú; Versión preliminar, 84p, 1988.

GIBSON, S.A. THOMPSON, R.N., WESKA, R.K., DICKIN, A.P.; LEONARDOS, O.H. **Late Cretaceous rift- related upwelling and melting of the Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil.** In: **Contrib Mineral Petrol.** 1997. v.126, p.303-314.

GHOSH, D. P. **The application of linear filter Theory to the Direct Interpretation of Geoelectrical Resistivity Measurements, Doctoral thesis, Tech. Univ. Delft, 1970, 125pp.**

GHOSH, D. P. Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. **Geophys. Prospect.** 1971b. 19: 769-775.

GONÇALVES, A. & SCHNEIDER, R.L. Geologia do centro-leste de Mato Grosso, Ponta Grossa, Petrobrás - DESUL, 1970, Nº 394, 43p. (**Relatório Técnico Interno**), inédito.

GRIPP, E.V. MOURA, I.B. VECCHIATO, A.B. e SALOMÃO, F.X.T. Compartimentação Morfopedologica do Parque Nacional de Chapada dos Guimarães, Resultados Preliminares. In **XIV Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água.** Cuiabá - MT. 2002.

HANTUSH, M.M.; MARINO, M.A. e ISLAM, M.R. Models for leaching of pesticides in soils and groundwater. In: **Journal of Hydrology** 227, p.66-83. 2000.

HARIA, A. H.; HODNETT, M.G. e JOHNSON, A.C. Mechanisms of groundwater recharge and pesticide penetration to a chalk aquifer in southern England. In: **Journal of Hydrology** 275, p.122-137, 2003. Disponível em www.sciencedirect.com.

HARARI, Z. Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes, J. **Applied Geophysics.** v. 36, Nº 1, pp. 43-52. 1996.

HEATH, R.C. Hidrologia Básica de Água subterrânea. United States Geological Survey water supply paper 2220, Tradução: Wrege, M: Potter, P. **Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS.** 84p. 1983.

IPT. Manual de métodos para interpretação de ensaios de aquífero. São Paulo (**IPT-Relatório, 25699**). 1988.

KELLER, G. V. Rock and mineral properties. Investigations in Geophysics, n.3. Electromagnetic Methods In. **Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists**, Ed. Misac N. Nabighian, v. 1, p. 13-51. 1987.

KOTERBA, M.T., BANKS, W.S.L., SHEDLOCK, R.J. Pesticides in shallow groundwater in the Delmarva Peninsula. J. Environ. Qual. 22(3), 500-518. 1993.

KUNG, K. J. S., DONOHUE, S. V. Improved solute-sampling protocol in a sandy vadose zone using ground-penetrating radar. **Soil Sci. Am. J.** 55 (6) 1543-1545. 1991.

LEICA GEOSYSTEMS. **Basic Level**. User Manual versão 1.0. Heerbrugg, 1999. 35p.

LEMOS, R. C., SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3ª ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 83p. 1996.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. **Departamento de Ciências Exatas/ESALQ/USP. Piracicaba – SP. 2000**.

LUCHESE, E. B., FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos da química do solo**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001.159p.

MALAGUTTI FILHO, W. **Utilização de técnicas geofísicas na caracterização de solos e rochas com aplicações na geologia de planejamento urbano**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 2v. 1991.

MALA GEOSCIENCE – RAMAC/GPR Software Manual - Version 2.28 – **Mala Geoscience**, Suécia, 1977, 65p.

MOKMA, D. L., SCHAETZL, R. J., DOOLITTLE, J. A., JOHNSON, E. P., **Ground penetrating radar study of ortstein continuity in some Michigan Haplaquode**. **Soil Sci. Am. J.** 54 (3), 1990. p.936 – 938.

MOREY, R. M. Continuous subsurface profiling by impulse radar. **In: ENGINEERING FOUNDATION CONFERENCE ON SUBSURFACE EXPLORATION FOR UNDERGROUND EXCAVATION AND HEAVY CONSTRUCTION**, Henniker. Proceedings..., Henniker: American Society of Civil Engineers, 1974, p.213-232.

MUNSELL SOIL COLOR CHARTS. **Macbeth Division of Koelmorgen instruments corporation, 2441**. North Calvest Street, Baltimore, Maryland 21218. 1988.

NAKASHIMA, Y., **O nível de água subterrânea pode ser estimado por GPR em áreas com reflexos múltiplos e ambíguos**. Cíntia for Northeast Asian Studies, Tohokv University, Cinde, 2001, 980-8576, Japan.

OLHOEFT, G. R., CAPRON, D. E. **Petrochemical causes of electromagnetic dispersion**. **In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR**, 5, 1994, Ontário. *Proceedings...*, Ontário: GPR'94, 1994, v.1, p.145-152.

OLIVEIRA, A. M. DOS S. & BRITO, S.N.A. **Geologia de Engenharia**, São Paulo – SP. 1998.

OLIVEIRA, A.I. DE & LEONARDOS, O.H. **Geologia do Brasil**, 2ª Edição com Revisão Atualizada, Rio de Janeiro, Serviços de Informações Agrícola, 1943, 813p.

OLIVEIRA, V. A.; AMARAL FILHO, Z. P. e VIEIRA, P. C. **Pedologia. Projeto RADAMBRASIL**, In: **Brasil**, M.M.E. Folha SD. 21 Cuiabá, 1982, p.257- 400, vol. 26.

PALACKY, G. J. **Resistivity characteristics of geologic targets in electromagnetic methods**, In: **Applied Geophysics**, ed. Nabighian, M.N., Soc. Expl. Geophys, pp. 53 – 126. 1987.

PUCKETT, W. E., COLLINS, M. E., SCHELLENTRAGER, G. W. **Design of soil map units on a karst area in wet central Florida**. Soil Sci. Soc. Am. J. 54 (4), 1990, p.1068 – 1073.

REINHOLD, G., Kirsch, J., HURTING, H. W., FLOTHMANN, D., ASSINK, J.W., van den Brink, W.J. **Remote sensing by electromagnetic induction (EMI), magnetometer and ground Penetrating radar**. Ist International FZK/tno conference on Contaminated Soil in cooperation with UFZ Leipzig-Halle. Utrecht/NL. p. 379-387, 1985.

RESENDE, M; CURI, N; REZENDE, S.B E CORRÊA, G.F. **Pedologia, Base para Distinção de Ambientes**. Viçosa: NEPUT. 2002.

RITSEMA, C.J., DEKKER, L.W. Distribution flow: a general process in the top layer of water repellent soils. **Water Resour. Res.** 31 (5), 1995, 1187-1200.

SALOMÃO, F.X.T. e ANTUNES F. de. S. – Solos em Pedologia. In: **Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia**, - São Paulo, 1998, p. 86 – 100.

SALOMÃO, F.X.T. Controle e Prevenção dos Processos Erosivos. Erosão e conservação dos solos: **conceitos, temas e aplicações** Antônio J.T. Guerra e outros. Rio de Janeiro-RJ. Editora Bertran Brasil. 1999 p.229-267.

SALOMÃO, F. X. de T. & GONÇALVES, K. C. O. **Potencialidade e Restrições ao uso do Solo em Micro Bacia Representativa da Produção Agrícola, Intensiva em Mato Grosso**. Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá-MT. 2003.

SILVA, L. A. **Aplicação geofísica para a caracterização do perfil do solo de uma vertente associada a processo erosivo linear no Município de Sorriso-MT**. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Campina Grande, 2002, 112 p.

SIMONS, R. W. Outline of a generalized theory of soil genesis. Soil Sci. Soc. An. Proc., Nº 23, p. 152-156, 1959.

SMITH, M.C., VELLIDIS, G., THOMAS, D. L., BREVE, M.A. **Measurement of water table fluctuations in a sandy soil using ground penetrating radar.** Trans. ASAE 35 (4), p.1161 – 1166. 1992

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIAS DO SOLO/SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo, Campinas-SP.** 1984.

SCHLUMBERGER, C. and M. and LEONARDON, E. G. Some observations concerning electrical measurements in anisotropic media, and their interpretation. Trans. Am. **Inst. Min. Metall. Eng.** 1934, p.110: p.159-182.

TURGUT, C. The contamination with organochlorine pesticides and heavy metals in surface water in Küçük Menderes River in Turkey, 2000-2002. **In: Environmental International** 29, p.29-32, 2003. Disponível em www.sciencedirect.com.

TOPP, G. C., DAVIS, J. L., ANNAN, A. P. **Electromagnetic determination of soil water content:** measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, v. 16, n.3, p. 574-582, 1980.

VALENTE, J. P. (Coord.). **Diagnóstico Sócio-Econômico do Estado de Mato Grosso. Abordagem de Variáveis Básicas.** Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, 1998. 2v. v1, 126p.

VAN OVERMEEREN, R. A., SARIOWAN, S. V., GEHRELS, J. C. **Ground penetrating radar for determining volumetric soil water content;** results of comparative measurements at two sites. J. Hidrol. 1997. 197 (1/4), p.316 – 338.

VIDAL-TORRADO, P. **Características gerais e a nova classificação dos solos brasileiros** p. 23-39. **In: Simpósio sobre a dinâmica de defensivos agrícolas no solo – Aspectos práticos e ambientais.** Piracicaba: ESALQ, 2002, p. 40-50, 07 e 08 novembro.

VIERIA, L. S. **Manual da Ciência do Solo – Com ênfase aos solos tropicais, ed. Agronômica Ceres LTDA.** 1988. 464p.

VILLIDIS, G., SMITH, M. C., THOMAS, D. L., ASSMUSSEN, L. E. **Detecting wetting front movement in a sandy soil with ground-penetrating radar.** Trans. ASAE 33 (6), 1990, p.1867 – 1874.

ZALAN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO J.C. J; VIEIRA, I.S.; ASTOLFI, M.M.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. – **A Divisão Tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná, Revista Brasileira de Geociências.** 1987.17(3): p.242-252.

ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. Mapeamento Geotécnico: uma proposta **metodológica**. **Geociências**. 1990, V9, p 55-66.

WALTON, W.C. **Groundwater resources evaluation**. New York – Hill Book Company. 1979, 664p.

WARD, S. H., HOHMANN, G. W. Electromagnetic theory for geophysical applications: **Electromagnetic Methods in applied Geophysics**. Tulsa: Society of Exploration Geophysists, ed. Misac N. Nabighian. 1987. V. 1, p. 131-311.

WESKA, R. K. **Geologia da Região Diamantífera de Poxoréu e áreas adjacentes, Mato Grosso**. Universidade de São Paulo, Departamento de Geociências, *Tese de Doutorado* - Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, 1996.219 p.

Anexo 1 – Planilha de campo das SEV1, SEV2, SEV3, SEV4 e SEV5.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO										
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA										
NGEA - NÚCLEO DE GEOFÍSICA E ESTUDOS AMBIENTAIS										
PROJETO		BIOCIDAS				DATA		04/12/01		
LOCAL		Fazenda Jurity				SEV No.		01		
OPERADOR		Alteredo			AUXILIARES		Alteredo, Mario, Claudia, Tânia e Livia.			
EQUIPAMENTO				SEV 1		fomsev 2.xls				
No.	AB/2	MN/2	SP	V	I	Rho	Q	N	Fo nte	Observação
1	1.0	0.30		4759.95	84.24	267.3		1.0		
2	1.3	0.30		3502.06	90.01	325.9		2.2		
3	1.8	0.30		2505.01	94.19	438.6		3.9		
4	2.4	0.30		1446.63	74.96	573.0		4.3		
5	3.2	0.30		1487.37	109.73	720.4		4.4		
6	4.2	0.30		996.46	104.26	878.3		4.7		848
7	4.2	1.0		4049.79	128.63	823.0		4.7		
8	5.5	1.0		2358.69	106.91	1013.7		5.1		
	7.5	1.0		1694.30	116.99	1236.9		5.4		Embreagem
9	10,0	1.0		1156.03	118.50	1517.1		5.6		1553
10	10,0	0.30		348.55	114.79	1588.5		5.0		
	13,0	1.0		754.85	113.78	1750.7		5.9		Embreagem
11	18,0	1,0		419.52	109.10	2951.9		6.6		
12	24,0	1,0		237.76	106.22	2021.8		7.2		2062
13	24	2.50		629.53	107.16	2103.1		7.5		
14	32	2.50		283.1	90.0	2011.4		8.3		
15	42	2.50		104.55	67.05	1722.1		9.2		
	55	2.50		48.04	64.68	1408.8		9.9		Embreagem
17	55	1.00		25.766	90.56	1351.4		9.7		1379
18	75	10,0		76.327	80.79	819.9		10.6		
	100	10		13.461	63.26	330.9		11.3		Embreagem
19	130	10		6.186	133.46	161.9		16.8		159
20	130	2.50		1.969	133.73	156.3		9.4		
21	150	10		4.948	151.50	114.9		7.4		

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
NGEA - NÚCLEO DE GEOFÍSICA E ESTUDOS AMBIENTAIS

PROJETO		BIOCIDAS				DATA	04/12/01				
LOCAL		Fazenda Jurity				SEV No.		02			
OPERADOR		Alteredo		AUXILIARES		Alteredo, Mario, Claudia, Tânia e Livia.					
EQUIPAMENTO		SEV 2				fomsev 2.xls					
No.	AB/2	MN/2	SP	V	I	Rho	Q	N	Fo n te	Observação	
1	1,00	0.30		5.000	112.3	212.1		-10			
2	1.3	0.30		3520	112.2	262.8		0.0			
3	1.8	0.30		2254.68	120.17	309.5		0.8			
4	2.4	0.30		1227.32	106.42	342.4		1.4			
5	3.2	0.30		813.07	108.77	397.3		2.0			
6	4.2	0.30		434.62	87.83	454.7		2.6		466	
7	4.2	1.00		1614.17	88.26	478.0		4.7			
8	5.5	1.00		1142.8	94.73	554.3		5.1			
9	7.5	1.00		730.3	93.84	675.5		5.4		Embreagem	
10	10,0	1.00		504.9	95.98	818.1		5.7		788	
11	10,0	0.30		139.9	96.64	757.7		5.2			
12	13,0	1.00		384.8	103.75	978.8		6.0		Embreagem	
13	18,0	1.00		238.29	101.16	1195.1		6.3			
14	24,0	1.00		149.74	96.47	1042.1		6.5		1226	
15	24	2.50		381.51	96.86	1410.0		6.2			
16	32	2.50		453.06	184.54	1569.9		6.6			
17	42	2.50		209.9	140.04	1655.4		7.0			
18	55	2.50		126.04	136.26	1754.6		7.4		Embreagem	
19	55	1.00		50.481	137.64	1742.2		7.7		1745	
20	75	10,0		242.628	143.38	1468.6		8.4			
21	100	10		87.283	147.65	919.3		9.4		Embreagem	
22	130	10		40.272	189.93	559.5		9.9		556	
23	130	2.50		9.954	190.51	554.6		9.0			
24	150	10		16.051	144.92	389.0		10.1			

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
NGEA - NÚCLEO DE GEOFÍSICA E ESTUDOS AMBIENTAIS

PROJETO		BIOCIDAS					DATA				04/12/01
LOCAL		Fazenda Jurity					SEV No.				03
OPERADOR		Alteredo			AUXILIARES		Alteredo, Mario, Claudia, Tânia e Livia.				
EQUIPAMENTO		SEV 3			fomsev2.xls						
No.	AB/2	MN/2	SP	V	I	Rho	Q	N	Fon te	Observação	
1	1.0	0.30		5000	93.85	253.9		1.4			
2	1.3	0.30		2426.8	66.08	307.7		2.3			
3	1.8	0.30		1720.2	80.58	352.1		3.6			
4	2.4	0.30		1095.0	82.04	396.3		4.2			
5	3.2	0.30		563.8	68.91	434.9		4.6			
6	4.2	0.30		405.06	76.17	488.6		5.0		471	
7	4.2	1.00		1330.8	76.49	454.8		4.6			
8	5.5	1.00		807.07	72.13	514.1		5.0			
9	7.5	1.00		591.32	82.5	622.0		5.3		Embreagem	
10	10,0	1.00		358.7	74.23	751.5		5.7		778	
11	10,0	0.30		113.19	74.75	792.2		6.3			
12	13,0	1.00		238.28	71.64	885.2		6.1		Embreagem	
13	18,0	1.00		206.8	101.33	1035.5		6.9			
14	24,0	1.00		106.88	86.39	1117.5		8.0		1130	
15	24	2.50		287.5	90.09	1142.4		8.1			
16	32	2.50		141.212	78.06	1156.9		9.5			
17	42	2.50		75.4	79.43	1048.4		11.1			
18	55	2.50		48.126	96.12	949.7		12.9		Embreagem	
19	55	1.00		18.475	96.35	924.2		13.2		937	
20	75	10,0		72.868	106.29	595.0		15.9			
21	100	10		20.382	115.14	273.3		16.4		Embreagem	
22	130	10		6.372	102.20	164.5		10.7			
23	130	2.50		1.585	102.94	163.4		6.3		164	
24	150	10		8.107	201.35	141.7		4.5			

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
NGEA - NÚCLEO DE GEOFÍSICA E ESTUDOS AMBIENTAIS

PROJETO		BIOCIDAS				DATA		04/12/01		
LOCAL		Fazenda Jurity				SEV No.		04		
OPERADOR		Alteredo			AUXILIARES		Alteredo, Mario, Claudia, Tânia e Livia.			
EQUIPAMENTO		SEV 4			fomsev2.xls					
No.	AB/2	MN/2	SP	V	I	Rho	Q	N	Fonte	Observação
1	1.0	0.30		5000.00	79.05	301.4		-1		
2	1.3	0.30		3117.70	77.01	339.2		0.9		
3	1.8	0.30		1587.41	69.33	377.6		2.5		
4	2.4	0.30		1424.54	103.56	408.4		3.6		
5	3.2	0.30		721.05	88.65	432.3		4.5		
6	4.2	0.30		547.47	108.45	463.9		5.1		461
7	4.2	1.00		1915.67	108.94	459.6		5.5		
8	5.5	1.00		717.34	65.05	506.7		6.0		
9	7.5	1.00		497.40	68.59	629.4		6.6		Embreagem
10	10,0	1.00		359.77	71.22	785.5		7.0		
11	10,0	0.30		108.81	71.90	791.7		6.6		788
12	13,0	1.00		355.33	98.96	947.6		7.8		Embreagem
13	18,0	1.00		186.62	81.93	1155.9		8.7		
14	24,0	1.00		144.644	100.01	1306.3		9.7		1325
15	24	2.50		376.709	100.29	1344.7		8.8		
16	32	2.50		214.756	96.72	1419.8		10.1		
17	42	2.50		90.895	76.49	1312.4		11.8		
18	55	2.50		32.279	49.56	1230.4		13.3		Embreagem
19	55	1.00		12.961	51.49	1195.8		14.9		1213
20	75	10,0		66.598	65.86	877.6		16.2		
21	100	10		30.344	108.85	433.5		18.5		Embreagem
22	130	10		9.012	93.96	253.1		18.0		
23	130	2.50		2.099	94.28	236.3		18.5		245
24	150	10		8.014	149.25	188.9		15.0		

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
NGEA - NÚCLEO DE GEOFÍSICA E ESTUDOS AMBIENTAIS

PROJETO		BIOCIDAS					DATA		04/12/01	
LOCAL		Fazenda Jurity					SEV No.		05	
OPERADOR		Alteredo			AUXILIARES		Alteredo, Mario, Claudia Tânia e Livia.			
EQUIPAMENTO				SEV 5		foms ev2. xls				
No.	AB/2	MN/2	SP	V	I	Rho	Q	N	Fo nte	Observação
1	1.0	0.30		5000.0	90.29	263.9		4.6		
2	1.3	0.30		3716.1	92.59	336.2		4.6		
3	1.8	0.30		1858.0	78.74	389.2		5.3		
4	2.4	0.30		1048.91	71.43	436.0		5.8		
5	3.2	0.30		706.74	27.65	483.7		6.1		
6	4.2	0.30		409.33	73.56	511.4		6.5		
7	4.2	1.00		1531.05	73.96	541.1		5.9		526
8	5.5	1.00		1071.43	81.18	606.4		6.2		
9	7.5	1.00		575.41	69.44	719.2		6.6		Embreagem
10	10,0	1.00		482.85	85.9	874.2		7.0		
11	10,0	0.30		135.97	86.62	821.2		7.0		848
12	13,0	1.00		351.07	89.33	1037.2		7.5		Embreagem
13	18,0	1.00		164.19	65.51	1271.7		8.2		
14	24,0	1.00		138.87	84.38	1486.5		8.7		1486
15	24	2.50		350.64	84.51	1485.5		8.4		
16	32	2.50		197.89	76.36	1657.1		8.9		
17	42	2.50		98.91	64.07	1705.2		9.5		
18	55	2.50		94.64	107.03	1677.2		10.3		Embreagem
19	55	1.00		37.84	107.24	1676.2		10.5		1677
20	75	10,0		179.6	89.78	1730.9		11.1		
21	100	10		71.50	94.98	1170.7		12.5		Embreagem
22	130	10		26.943	99.01	718.1		13.9		
23	150	10		10.426	72.55	505.6		14.4		

Anexo 2– Tabela de Nivelamento da área de estudo na Fazenda Jurity.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO						
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA						
NGEA - NÚCLEO DE GEOFÍSICA E ESTUDOS AMBIENTAIS						
BIOCIDAS/FACUAL/UFM						
PROJETO	T	DATA			03/09/2004	PAG.
LOCAL Faz. Jurity - Município Dom Aquino-MT						
OPERADOR		Mário	Shozo, Alício e AUXILIARES Cecílio			
COTA de Referência		583,78	Obtido com GPS			
Nº Ponto	RÉ	VANTE	Nº Ponto	DESNÍVEL Ré-Vante	Cota	OBS.N
0,00	259,60		0,00	0,00	583,78	25,00
5,00	260,20		5,00	-0,01	583,77	
15,00	200,50		15,00	0,60	584,37	
23,00	137,80		23,00	0,63	585,00	
		77,20	34,00	0,61	585,60	
		33,10	41,00	0,44	586,05	
		11,20	44,70	0,22	586,26	
44,70	280,50		44,70	0,00	586,26	68,75
60,55	187,30		60,55	0,93	587,20	
62,80	161,30		62,80	0,26	587,46	
64,60	158,50		64,60	0,03	587,48	
		87,20	80,00	0,71	588,20	
		54,60	84,00	0,33	588,52	
		48,50	88,00	0,06	588,58	
88,00	256,40		88,00	0,00	588,58	111,70
93,00	202,50		93,00	0,54	589,12	
97,00	213,30		97,00	-0,11	589,02	
107,00	158,70		107,00	0,55	589,56	
		143,10	114,00	0,16	589,72	
		108,70	118,00	0,34	590,06	
		109,60	122,00	-0,01	590,05	
		31,90	141,00	0,78	590,83	174,30
141,00	273,00		141,00	0,00	590,83	
147,00	225,60		147,00	0,47	591,30	
149,00	231,30		149,00	-0,06	591,25	
149,00	231,80		149,00	-0,01	591,24	

Nº Ponto	RÉ	VANTE	Nº Ponto	DESNÍVEL Ré- Vante	Cota	OBS.N
158,00	206,50		158,00	0,25	591,49	
163,00	151,60		163,00	0,55	592,04	
168,00	160,70		168,00	-0,09	591,95	
		139,80	180,00	0,21	592,16	
		121,30	185,00	0,19	592,35	
		82,00	190,00	0,39	592,74	
		17,40	207,00	0,65	593,39	
207,00	204,10		207,00	0,00	593,39	227,60
210,00	208,80		210,00	-0,05	593,34	
214,70	162,00		214,70	0,47	593,81	
218,50	183,50		218,50	-0,22	593,59	
		128,10	235,00	0,55	594,15	
		75,20	240,00	0,53	594,67	
		101,00	245,00	-0,26	594,42	
		40,50	260,00	0,61	595,02	
		4,00	265,00	0,37	595,39	
265,00	230,50		265,00	0,00	595,39	315,00
269,00	239,00		269,00	-0,09	595,30	
289,00	194,10		289,00	0,45	595,75	
294,50	137,20		294,50	0,57	596,32	
299,00	160,80		299,00	-0,24	596,08	
		82,10	330,00	0,79	596,87	
		45,00	336,00	0,37	597,24	
		60,10	340,00	-0,15	597,09	
340,00	209,60		340,00	0,00	597,09	365,00
		125,00	379,00	0,85	597,94	
		101,10	384,00	0,24	598,18	
		111,90	388,00	-0,11	598,07	
		72,30	416,00	0,40	598,46	
		21,00	422,00	0,51	598,98	
422,00	149,00		422,00	0,00	598,98	440,00
426,00	185,50		426,00	-0,37	598,61	
429,50	162,30		429,50	0,23	598,84	
		129,50	450,00	0,33	599,17	
		105,00	470,00	0,25	599,42	