

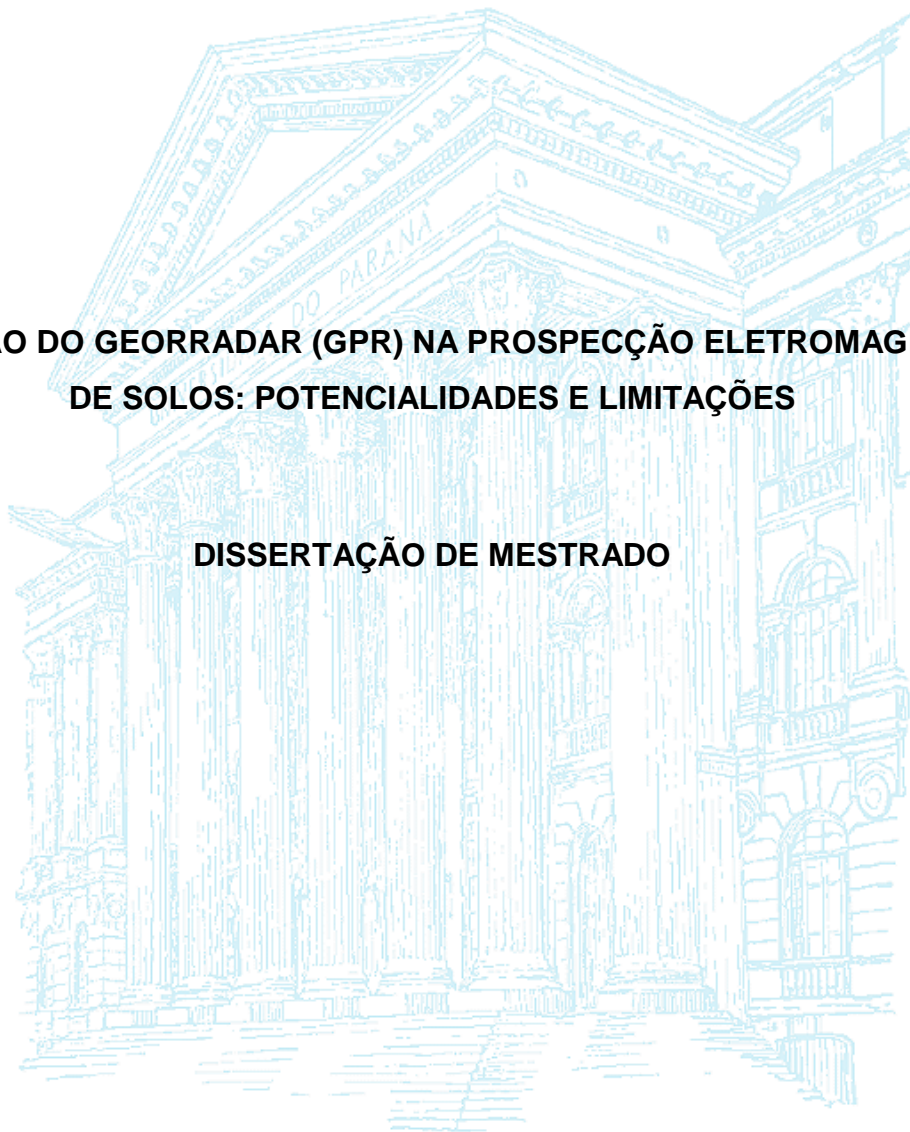
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

**SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

ORESTES JARENTCHUK JUNIOR

**APLICAÇÃO DO GEORRADAR (GPR) NA PROSPECÇÃO ELETROMAGNÉTICA
DE SOLOS: POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



**CURITIBA
2013**

ORESTES JARENTCHUK JUNIOR

**APLICAÇÃO DO GEORRADAR (GPR) NA PROSPECÇÃO ELETROMAGNÉTICA
DE SOLOS: POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geografia, Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geografia, Linha de Pesquisa Paisagem e Análise Ambiental.

Orientador: Leonardo José Cordeiro Santos

**CURITIBA
2013**

-
- J37a Jarentchuk Junior, Orestes
Aplicação do georradar (GPR) na prospecção eletromagnética de solos: potencialidades e limitações / Orestes Jarentchuk Junior. - Curitiba, 2013.
142f.: il. [algumas color.]; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2013.
Orientador: Leonardo José Cordeiro Santos.
Bibliografia: p. 137-142.
1. Ciência do solo. 2. Prospecção - Métodos geofísicos. 3. Geofísica – Prospecção. I. Universidade Federal do Paraná. II. Santos, Leonardo José Cordeiro. III. Título.

CDD 622.15



PARECER

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Geografia reuniram-se para a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo (a) candidato (a) **ORESTES JARENTCHUK JUNIOR** intitulada “**APLICAÇÃO DO GEORADAR (GPR) NA PROSPECÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE SOLOS: POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES**”, para obtenção do grau de Mestre em Geografia, do Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná Área de Concentração **Espaço, Sociedade e Ambiente**, Linha de Pesquisa **Paisagem e Análise Ambiental**.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido o (a) candidato (a), são de parecer pela APROVAÇÃO da Dissertação.

Curitiba, 22 de março de 2013.

Nome e Assinatura da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro Santos - Orientador

Prof. Dr. Marcelo Accioly Teixeira de Oliveira (UFSC)

Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza (UFRGS)

Dedico este trabalho à memória
de meu pai e amigo Orestes Jarentchuk.

AGRADECIMENTOS

Ao professor, orientador e também amigo Leonardo José Cordeiro Santos por acreditar em minha capacidade para esta pesquisa, pela paciência e principalmente pelo conhecimento relativo à Pedologia.

À CAPES pelo apoio financeiro, e à secretaria do Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná, em especial a Luis Carlos Zem e Adriana Cristina Oliveira pelo apoio e prestatividade ilimitada.

Aos grandes amigos e irmãos Alexei Nowatzki, pelo convívio, aprendizado e descontração, e Márcio Aluizio Fonsaca Grochocki, pois sem seu apoio logístico o desenvolvimento deste estudo seria dificultado.

A todos os integrantes do Laboratório de Biogeografia e Solos da UFPR com os quais mantive contato, em especial a Eduardo Vedor de Paula, Edivando Vitor Couto e Kael da Silva Petelak, pelos bons momentos de convivência durante o curso e discussões pertinentes ao tema, permitindo um processo de aprendizagem em conjunto.

A todos os professores que direta ou indiretamente contribuíram através da condução de suas disciplinas: Eduardo Guimarães Barboza, Gustavo Ribas Curcio, Irani dos Santos, Tony Vinicius Moreira Sampaio, Francisco Ferreira e Welitom Rodrigues Borges.

À minha namorada, companheira e amiga Ângela Dileta Lima Santa Bárbara pelo apoio, compreensão e conforto em todos os momentos.

Agradeço imensamente à minha família e principalmente à minha mãe Sônia Maria Kuritza Jarentchuk, pela paciência, compreensão e apoio incondicional.

Agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“...O primeiro precedente (se for bom) é, raramente, o resultado de uma imitação.(...) O que é bom, por ser uma ação provocada, é mais forte no começo. (...) As coisas novas não encaixam tão bem quanto as antigas; embora ajudem pela sua utilidade, perturbam pela inconformidade; são como os forasteiros, mais admirados e menos favorecidos”.

Francis Bacon, Ensaio nº24 ‘De Inovações’, 1612.

RESUMO

Dentre as técnicas adotadas em métodos geofísicos, o *Ground Penetrating Radar* (GPR), ou Georradar como é comumente conhecido no Brasil, tem sua utilização intensificada recentemente. Muitos são os trabalhos técnicos e científicos que abordam a sua aplicação no reconhecimento da subsuperfície em estudos de investigação nas geociências, porém poucos envolvem exclusivamente a aplicação do Georradar na pedologia. Entende-se que as características morfológicas dos solos e seus atributos físicos em muito influenciam na qualidade das respostas do equipamento e interferem na opção por parâmetros adequados ao objetivo de estudo. Uma relação que deve ser considerada diz respeito à textura do solo e à profundidade de penetração do sinal emitido, sendo que em solos com textura arenosa, apresentando teores de argila abaixo de 15%, tem-se o melhor deslocamento das ondas eletromagnéticas e menor dispersão de energia, ao passo que em solos com texturas médias a argilosas, contendo teores de argila entre 15 e 35%, têm-se como implicação a atenuação do sinal. Portanto, a condutividade elétrica é diretamente proporcional à capacidade de troca catiônica (CTC) e a profundidade de penetração inversamente proporcional à quantidade de argila. Com base no conhecimento dos princípios de funcionamento do Georradar, fez-se o uso do equipamento para o reconhecimento da aplicabilidade de um método geofísico, enquanto técnica de prospecção eletromagnética de solos, a fim de delimitar a geometria de volumes pedológicos em diferentes solos paranaenses. Procurou-se também identificar assinaturas específicas considerando a heterogeneidade dos atributos físicos do solo, enquanto influência no comportamento das ondas eletromagnéticas em subsuperfície. Verificou-se que o teor de argila condicionou diretamente os valores das constantes dielétricas (k) encontradas, calculadas em função da determinação da velocidade média de propagação das ondas eletromagnéticas para as três classes de solos em estudo, refletindo a natureza do material em subsuperfície. 1) Espodossolo: $k=5,1$, coerente com valores definidos para solos arenosos e secos (k entre 4 e 6); 2) Cambissolo: $k=17,5$, concordando com valores identificados para solos argilosos e saturados (k entre 10 e 20); 3) Argissolo: $k=11$, concordante com valores para solos muito argilosos e saturados (k entre 10 e 15). A constante dielétrica encontrada para o Cambissolo supera o valor encontrado para o Argissolo e tais valores podem estar associados às diferenças entre as atividades coloidais destes tipos de solos. Para os Cambissolos, caracterizados como solos pouco desenvolvidos e intemperizados, predominam os argilominerais com retículo 2:1, portanto apresentam argila de atividade alta (T_a), enquanto que os Argissolos apresentam argila de atividade baixa (T_b) já que possuem argilominerais com retículo 1:1. Concluiu-se que a integração das técnicas geofísica (Georradar) e convencional para a prospecção de solos se mostrou eficiente para o melhor reconhecimento e determinação das geometrias dos volumes pedológicos, mas há ressalvas. De modo geral, permitiu a identificação das continuidades laterais dos horizontes pedológicos e a eliminação da inferência na delimitação de seus limites. No entanto, para solos em que há predomínio de argila e não há significativa mudança textural entre seus horizontes, o método Georradar não deve ser empregado como a principal ferramenta para o reconhecimento dos volumes pedológicos.

Palavras-chave: Pedologia, Georradar, GPR, Prospecção Eletromagnética de Solos.

ABSTRACT

Among the techniques adopted in geophysical methods, Ground Penetrating Radar (GPR) or “Georadar” as it is commonly known in Brazil, its use has intensified recently. There are many technical and scientific papers which discuss its application in the recognition of subsurface in geosciences researches, but few exclusively involve the application of GPR in Pedology. It is understood that the soils’ morphological characteristics and their physical attributes influence a lot in the quality of the responses of the equipment and interfere in the choice of appropriate parameters to the purpose of study. A relation that should be considered relates to the soil texture and penetration depth of the emitted signal, once in sandy texture soils, with clay content below 15%, it has the best shift of the electromagnetic waves and smaller energy dispersion, whereas in soils with medium to clayey textures, containing clay content between 15 and 35%, have implications as signal attenuation. Therefore, the electrical conductivity is directly proportional to the cation exchange capacity (CEC) and the penetration depth inversely proportional to the amount of clay. Based on knowledge of the operation’s principles of GPR, the equipment was used for the recognition of the applicability of a geophysical method, as soil electromagnetic prospecting technique, in order to delimitate the geometry of pedological volumes in different Paraná soils. It was also sought to identify specific signatures considering the heterogeneity of soil physical properties, while it influences on the behavior of electromagnetic waves in the subsurface. It was ascertained that the clay content directly conditioned the values of the found dielectric constants (k), calculated on the basis of the determination of the average speed of electromagnetic waves propagation for the three studied soil types, reflecting the nature of the subsurface material. 1) Spodosol: $k=5.1$, consistent with defined values for sandy and dry soils (k between 4 and 6); 2) Inceptisols: $k=17.5$, agreeing with identified values for saturated clay soils (k between 10 and 20); 3) Ultisols $k=11$, in agreement with saturates clayey soils values (k between 10 and 15). The dielectric constant found for Inceptisol exceeds the Ultisol value and such values may be associated to the differences between the colloidal activities of these kinds of soils. Inceptisols, characterized as underdeveloped and weathered soils, predominated the clay minerals with 2:1 lattice, therefore they show high clay activity, while Ultisols have low clay activity since they possess clay minerals with 1:1 lattice. It was concluded that the integration of geophysical techniques (GPR) and conventional for the soil prospection, it has proved efficient for better recognition and determination of the pedological volumes geometry, but there are caveats. Generally it was allowed the identification of lateral continuity of the pedological horizons and the elimination of inference in the delimitation of their boundaries. However, for soils in which there is clay predominance and there is no significant textural change among its horizons, the GPR method should not be used as the main tool for the pedological volumes recognition.

Keywords: Pedology, GPR, Electromagnetic Prospecting Soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil de solo típico de um Cambissolo.....	19
Figura 2 – Localização das áreas de aplicação do mapeamento eletromagnético. ..	23
Figura 3 – Representação hipotética de funcionamento de emissão e recepção das ondas eletromagnéticas em subsuperfície pelo Georradar.....	35
Figura 4 – Exemplo de radargrama obtido pelo Georradar.	36
Figura 5 – Posição da frequência de operação do Georradar no espectro eletromagnético.	36
Figura 6 – Configuração de propagação da onda eletromagnética.	40
Figura 7 – Composição de uma onda senoidal: frequência hipotética igual a 4.	41
Figura 8 – Comportamento das cargas em função da aplicação de uma corrente de condução (adaptado de Annan, 2001).	46
Figura 9 – Comportamento das cargas em função da aplicação de uma corrente de deslocamento (adaptado de Annan, 2001).....	47
Figura 10 – Configuração vetorial da pegada ou cone de imageamento.....	49
Figura 11 – Relação entre a pegada de imageamento e a resolução horizontal. Os traços de radar hachurados representam o empilhamento de dados (adaptado de Reynolds, 1997).....	50
Figura 12 – Constituição do solo em quatro elementos (adaptado de Howe, 2000). ..	51
Figura 13 - Diagrama triangular para grupamentos texturais de solos (adaptado de EMBRAPA, 2013).	55
Figura 14 – Estrutura de Trabalho Adotada.	61
Figura 15 – Unidade de Controle do Georradar (Modelo SIR-3000).....	63
Figura 16 – a) Georradar em modelo móvel. b) Conjunto de antenas emissora e receptora com frequência central de 270 Mhz.....	64
Figura 17 – Implantação das hastes metálicas no perfil pedológico.	64
Figura 18 – a) Radargrama bruto; b) Reconhecimento das hastes metálicas a partir de hipérbolos de reflexão.	71
Figura 19 – Radargrama em processamento: correção do tempo zero.....	72
Figura 20 – Radargrama em processamento: remoção do plano de fundo.	73
Figura 21 – Radargrama em processamento: aplicação do procedimento de deconvolução.....	74

Figura 22 – a) Identificação das hipérbolas de reflexão (em vermelho); b) Aplicação do procedimento de migração pelo método de Kirchhoff, identificando a localização das hastes metálicas (círculos vermelhos) inseridas no solo a partir do colapso das hipérbolas de reflexão. Com base no procedimento de migração, é possível realizar a conversão do perfil de tempo para profundidade.	75
Figura 23 – a) Radargrama em processamento sem a aplicação de compensação sobre os refletores; b) Radargrama em processamento após a aplicação de compensação sobre os refletores.	77
Figura 24 – a) Radargrama em processamento sem a aplicação de filtros <i>FIR</i> ; b) Radargrama processado após a aplicação de filtros <i>FIR</i>	78
Figura 25 – a) Radargrama processado; b) Radargrama em interpretação: os traços verticais representam a configuração da onda em subsuperfície (traços pontuais), enquanto os traços sub-horizontais representam a delimitação entre camadas; c) Radargrama interpretado: perfil pedológico.	80
Figura 26 – Traço Pontual de Radargrama: As amplitudes positivas são representadas em vermelho, enquanto as amplitudes negativas em azul (adaptado de Ludwig <i>et al.</i> , 2011).	81
Figura 27 – Elementos para a interpretação de camadas estratigráficas em radargramas para estudos sedimentológicos (adaptado de Neal, 2004).	82
Figura 28 – Elementos para a interpretação das zonas refletoras em radargramas para estudos pedológicos (modificado de Neal, 2004).	83
Figura 29 – Mapa de localização da Floresta Estadual do Palmito.	85
Figura 30 – a) Trilha de imageamento com identificação da trincheira de observação “T”. b) Fim da trilha de imageamento com identificação da zona de observação em corte “C”	86
Figura 31 – Perfil pedológico da trincheira T.	87
Figura 32 – Perfil pedológico corte C.	88
Figura 33 – Identificação das zonas refletoras sobre o radargrama para as posições da trincheira (detalhe A) e do corte (detalhe B).	91
Figura 34 – Interpretação do radargrama processado com identificação das zonas refletoras e definição do perfil pedológico em Espodossolo.	94
Figura 35 – Mapa de localização da Fazenda Canguiri (UFPR).	96

Figura 36 – a) Trilha de imageamento sob reflorestamento experimental de pinus. B) Pedocomparador indicando a diferenciação de cor nos horizontes das trincheiras T1 e T2.	97
Figura 37 – Perfil pedológico da trincheira T1 (montante).	98
Figura 38 – Perfil pedológico da trincheira T2 (jusante).	100
Figura 39 – Sondagem ST1: predomínio de argila no horizonte B.	102
Figura 40 – Sondagem ST1: presença de mosqueados com tons escuros no horizonte C.....	102
Figura 41 – Sondagem ST2: presença significativa de clastos no horizonte Bi.	103
Figura 42 – Identificação das zonas refletoras sobre o radargrama para as posições das trincheiras T1 (detalhe A) e T2 (detalhe B).	106
Figura 43 – Distribuição e geometria dos horizontes pedológicos na topossequência da Fazenda Canguiri e indicação do segmento em prospecção com georradar (adaptado de Rakssa, 2007).	108
Figura 44 – Radargrama processado com indicação dos traços pontuais (Parte A).	109
Figura 45 – Radargrama processado com indicação dos traços pontuais (Parte B).	110
Figura 46 – Radargrama com a identificação das zonas refletoras em Cambissolo (Parte A).	111
Figura 47 – Radargrama com a identificação das zonas refletoras em Cambissolo (Parte B).	112
Figura 48 – Interpretação do radargrama e definição do perfil pedológico em Cambissolo (Parte A).	113
Figura 49 – Interpretação do radargrama e definição do perfil pedológico em Cambissolo (Parte B).	114
Figura 50 – Mapa de localização da Fazenda Iguatemi (UEM).	116
Figura 51 – Ribeirão Centenário, localizado abaixo da trilha.....	117
Figura 52 – a) Entorno da trincheira T1, demonstrando a situação atual da superfície com decapeamento da vegetação e alteração do horizonte superficial. b) Situação atual da vegetação de entorno da trilha de imageamento. Observa-se a predominância de espécies gramíneas com uso do espaço para pastoreio.	118
Figura 53 – Perfil pedológico da trincheira T1 (Argissolo Vermelho-Amarelo).	119

Figura 54 – Perfil pedológico esquemático e comportamento de propagação das ondas eletromagnéticas entre os horizontes da trincheira T2 (Argissolo Vermelho).	121
Figura 55 – Identificação das zonas refletoras sobre o radargrama para as posições das trincheiras T1 (detalhe A) e T2 (detalhe B).	125
Figura 56 – Radargrama processado com indicação dos traços pontuais.	127
Figura 57 – Radargrama com a identificação das zonas refletoras em Argissolos.	128
Figura 58 – Interpretação do radargrama e definição do perfil pedológico em Argissolos.	129
Figura 59 – Perfil Representativo da Planície Costeira Paranaense (adaptado de Galvão <i>et. al.</i> [s.d.]).	132

LISTA DE QUADROS

Quadro1 - Antenas de Georradar: frequências centrais, profundidades médias e aplicações. Fonte: GSSI / Alpha Geofísica – Brasil (Adaptado).	37
Quadro 2 – Constantes dielétricas (k), velocidade, atenuação e condutividade elétrica dos materiais (adaptado de Davis & Annan, 1989).	44
Quadro 3 – Constantes dielétricas dos elementos constituintes dos solos.....	52
Quadro 4 – Tipos de argilominerais (adaptado de Wutke & Camargo, 1972).....	54
Quadro 5 – Grupamentos texturais de solos (baseado em EMBRAPA, 2013).	54
Quadro 6 – Potencialidade da aplicação do Georradar em função dos tipos de solos	59
Quadro 7 – Tipos de solos e profundidade máxima de imageamento em função da frequência da antena empregada (adaptado de Doolittle <i>et. al.</i> , 2009).	60
Quadro 8 – Tipos de solos e caracterização de seus locais de origem.	62
Quadro 9 – Janelas de tempo definidas em função da profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas para o imageamento dos solos selecionados.....	68
Quadro 10 – Constantes dielétricas definidas para diferentes classes texturais de solos	69
Quadro 11 – Parâmetros adotados para o imageamento dos solos apresentados...	70
Quadro 12 – Descrição dos horizontes pedológicos da trincheira “T”.....	87
Quadro 13 – Descrição dos horizontes pedológicos da zona de observação em corte de estrada (C).	89
Quadro 14 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodossolos.	90
Quadro 15 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodossolos.	90
Quadro 16 – Descrição dos horizontes pedológicos da trincheira T1.....	99
Quadro 17 – Descrição dos horizontes pedológicos da trincheira T2.	100
Quadro 18 – Descrição dos horizontes pedológicos observados pela sondagem “ST1”	101
Quadro 19 – Descrição dos horizontes pedológicos observados pela sondagem “ST2”	103
Quadro 20 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodossolos.	105

Quadro 21 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodossolos.	105
Quadro 22 – Descrição dos horizontes pedológicos da trincheira T1.	119
Quadro 23 – Descrição dos horizontes pedológicos da zona de observação “T1”.	121
Quadro 24 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodossolos.	123
Quadro 25 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodossolos.	124
Quadro 26 – Constantes dielétricas de aquisição e calculadas.	135

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS	xiv
1. INTRODUÇÃO	18
2. GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO ESTUDO PEDOLÓGICO	24
2.1. MÉTODOS DE PROSPECÇÃO REMOTA	25
2.2. MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	27
2.2.1. Métodos Potenciais	28
2.2.2. Métodos de Fontes Artificiais.....	29
2.2.3. Características do Sistema Georradar	33
2.2.3.1. Princípios de Funcionamento do Georradar	34
3. PRINCÍPIOS DA PROSPECÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE SOLOS.....	39
3.1. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E PROFUNDIDADE DE IMAGEAMENTO.....	40
3.1.1. Propriedades Físicas das Ondas Eletromagnéticas.....	40
3.1.2. Propagação das Ondas Eletromagnéticas em Subsuperfície	43
3.1.2.1. Permeabilidade Magnética (μ)	44
3.1.2.2. Permissividade Dielétrica (ϵ).....	45
3.1.2.3. Condutividade Elétrica (σ).....	46
3.1.2.4. Índice de Atenuação (α).....	47
3.1.2.5. Velocidade de Propagação (V)	48
3.1.2.6. Pegada de Imageamento.....	48
3.1.3. Propriedades Físico-Químicas do Solo e a Condutividade Elétrica	51
3.1.3.1. Porosidade e Teor de Umidade	51
3.1.3.2. Textura e Capacidade de Troca Catiônica (CTC).....	52
3.1.3.3. Salinidade.....	56
3.1.3.4. Matéria Orgânica e Temperatura	57

4. APLICAÇÃO DO GEORRADAR EM ESTUDOS PEDOLÓGICOS	58
4.1. PROCEDIMENTOS TÉCNICOS E METODOLÓGICOS	61
4.1.1. Método de Prospecção Eletromagnética em Perfil Pedológico.....	63
4.1.1.1. Configurações do Georradar	65
4.1.2. Processamento dos Dados de Imageamento.....	72
4.1.2.1. Processamentos Básicos	72
4.1.2.2. Processamentos Avançados.....	76
4.1.3. Interpretação dos Dados de Imageamento	79
5. RECONHECIMENTO DA GEOMETRIA DE SOLOS COM USO DO GEORRADAR.....	84
5.1. ESPODOSSOLOS.....	84
5.1.1. Caracterização da Área em Prospecção	84
5.1.2. Descrição dos Perfis Pedológicos	86
5.1.3. Interpretação dos Perfis em Radargramas.....	89
5.2. CAMBISSOLOS.....	95
5.2.1. Caracterização da Área em Prospecção	95
5.2.2. Descrição dos Perfis Pedológicos	98
5.2.3. Interpretação dos Perfis em Radargramas.....	104
5.3. ARGISSOLOS.....	115
5.3.1. Caracterização da Área em Prospecção	115
5.3.2. Descrição dos Perfis Pedológicos	118
5.3.3. Interpretação dos Perfis em Radargramas.....	122
6. POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DA APLICAÇÃO DO GEORRADAR NA PROSPECÇÃO ELETROMAGNÉTICA DOS SOLOS APRESENTADOS.....	130
6.1. POTENCIALIDADES	130
6.2. LIMITAÇÕES	132
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137

1. INTRODUÇÃO

Os solos são constituídos por um conjunto de componentes físico, químicos e biológicos, relacionados entre si, que acabam caracterizando uma conformação local específica. Todos os elementos que caracterizam os diferentes tipos de solos possuem seus processos relacionados entre si e ao ambiente que os contêm, condicionados por fatores como o clima, organismos, material de origem, relevo e o tempo de formação (LEPSCH, 2002).

Dentre as muitas definições de Solo, podemos dizer que este é um meio dinâmico em perpétua evolução, teoria que parece estar atrelada àquela formulada por Darwin sobre a evolução das espécies, conforme aponta Espindola (2010). Outra definição aceita para os solos é a sua identificação como

um corpo natural caracterizado por uma unidade de amostragem tridimensional (pedon), que está relacionada a um agrupamento deles (polipedons) que, por sua vez, estão incluídos em um indivíduo solo (BRADY & WEIL, 2013, p. 67).

Considerando a importância do mapeamento pedológico para o planejamento ambiental e seu potencial como subsídio ao zoneamento de aptidão do uso do solo, tem-se a necessidade de um mapeamento de detalhe que caracterize não só a distribuição geográfica dos tipos do solo em área, mas também em volume e profundidade.

Entende-se, portanto, que o reconhecimento da geometria dos horizontes pedológicos, bem como de suas propriedades físicas, corresponde a um procedimento importante para a estimativa da produtividade de determinada área de interesse (SUCRE *et al.*, 2011). Harrison *et al.* (2011) ratificam a necessidade de estudos dos solos em seus volumes como um todo, afirmando que as propriedades que influenciam diretamente sobre a capacidade de produção dos solos têm variação em profundidade.

Os métodos de prospecção convencionais de solos para mapeamentos de detalhe envolvem investigações ao longo de perfis, levantamentos de áreas-piloto, estudos de topossequências, sistema de malhas e o método do caminhamento livre, conforme destaca o Manual Técnico de Pedologia

fornecido pelo IBGE (2007). Para a caracterização do solo, com objetivo de reconhecer a geometria de seus horizontes e propriedades morfológicas, destacam-se os estudos em topossequências, os quais permitem identificar e correlacionar os tipos de solos e suas propriedades com o relevo.

A técnica comumente adotada para a caracterização dos solos compreende a observação de suas camadas em perfil, tendo em vista que cada tipo de solo é definido conforme a sequência de seus horizontes, sendo que a exposição dessa sequência é denominada “perfil do solo” (BRADY & WEIL, 2013).

O perfil de solo pode apresentar uma série de horizontes que são definidos em função de algumas características morfológicas principais, a saber: profundidade e espessura dos horizontes, cor, granulometria, textura, estrutura e consistência (IBGE, 2007).

Um perfil de solo típico e completo pode apresentar até cinco horizontes principais, que compõem o chamado regolito (conjunto de materiais inconsolidados e camadas de solo), identificados por convenção através das letras maiúsculas “O”, “A”, “E”, “B” e “C” (LEPSCH, 2002). Um perfil típico de Cambissolo, por exemplo, pode ser observado através da Figura 1.

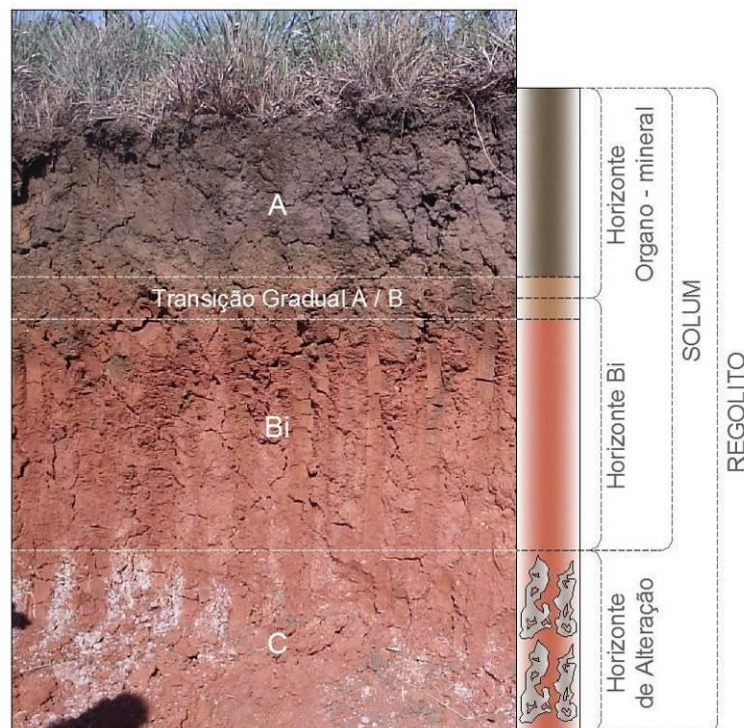


Figura 1 – Perfil de solo típico de um Cambissolo.

Um horizonte “O” representa a camada orgânica que repousa sobre horizontes minerais e podem ser denominados também como serrapilheira, apresentando restos vegetais e até animais pouco decompostos.

O horizonte “A”, por sua vez, identifica uma camada superficial do solo organo-mineral, possuindo matéria orgânica parcialmente decomposta, denominada húmus.

Os horizontes de eluviação “E” são assim caracterizados por sofrerem um processo de migração de argila ou óxidos de ferro e alumínio. Já o horizonte “B” é definido como um horizonte mineral, cuja camada pode sofrer processos de agregação ou de iluviação, com a concentração de materiais removidos dos horizontes superiores.

Um horizonte “C” refere-se a uma camada de material inconsolidado proveniente da alteração da rocha matriz “R”, cuja intemperização originou o solum (horizontes “A” e “B”).

Em relação às geotecnologias adotadas para estudos em subsuperfície, mesmo que sua utilização seja em grande parte para estudos geológicos de caráter de exploração e ambientais, os métodos geofísicos apresentam-se com grande potencial para aplicação em estudos pedológicos. Principalmente aqueles cuja aplicação ocorre por meio de prospecção eletromagnética, os quais permitem a caracterização em subsuperfície de propriedades dos solos em detalhe, tais como a profundidade, o teor de umidade e a distribuição contínua de horizontes pedológicos.

Portanto, no que diz respeito aos estudos pedológicos, a prospecção eletromagnética com a utilização do Georradar é adotada como método geofísico para o presente trabalho e se refere ao reconhecimento da geometria de volumes pedológicos em diferentes tipos de solos.

Em geral, os métodos geofísicos são adotados para trabalhos de prospecção indireta, isto é, sondagens não destrutivas, permitindo o reconhecimento da subsuperfície em trabalhos de investigação geológica, arqueológica, hidrológica, geotécnica, ambiental e também de solos.

Inúmeros são os trabalhos técnicos e científicos que abordam essas aplicações, mas no Brasil, raros são os estudos que envolvam exclusivamente a aplicação do Georradar como ferramenta para mapeamentos de solos,

especialmente no que se refere à delimitação das geometrias de seus horizontes.

Para a correta aplicação do Georradar, faz-se necessário considerarmos a heterogeneidade dos atributos físicos e químicos do solo, atributos esses que implicam no condicionamento do comportamento em subsuperfície das ondas eletromagnéticas emitidas pelo equipamento, que são o núcleo de funcionamento desse sistema de imageamento, bem como as condições de acesso à área de estudo.

Assim, a construção do presente trabalho é embasada teoricamente em estudos oferecidos pela literatura existente acerca da compreensão sobre o funcionamento do Georradar, sendo o objetivo principal desta pesquisa avaliar e determinar as potencialidades e limitações de sua aplicação para a prospecção eletromagnética de solos.

Para tanto, é preciso compreender as relações entre os princípios de funcionamento do equipamento e as propriedades físico-químicas de solos em diferentes paisagens.

Especificamente, têm-se como objetivos:

- a) Reconhecer a aplicabilidade de um método geofísico enquanto técnica de prospecção eletromagnética de solos;
- b) Delimitar a geometria e continuidades laterais dos horizontes pedológicos com redução significativa de inferência, a partir do reconhecimento de diferentes refletores subterrâneos em função de constituintes dos solos;
- c) Identificar permissividades dielétricas específicas em diferentes tipos de solos através das velocidades médias de propagação das ondas eletromagnéticas em subsuperfície;
- d) Definir um método de interpretação dos radargramas aplicado à pedologia.

Nesse contexto, o trabalho realizado traz a preocupação em avaliar um método de prospecção não destrutiva como ferramenta auxiliar para as atividades de reconhecimento de solos em mapeamentos pedológicos de detalhe, a partir do reconhecimento da geometria e espacialização dos volumes pedológicos em subsuperfície.

Tomou-se então como base a identificação da configuração de refletores em função das texturas, concentração de minerais primários e/ou clastos, umidade e acúmulo de matéria orgânica nos horizontes de diferentes tipos de solos.

São apresentados os fundamentos e princípios de funcionamento do equipamento no que tange as propriedades físicas das ondas eletromagnéticas e seu comportamento de propagação no subsolo. Em particular, devido à influência do campo elétrico induzido em subsuperfície e às especificidades das propriedades físico-químicas dos solos imageados.

De maneira geral, este estudo traz a aplicação do Georradar para a prospecção eletromagnética e reconhecimento da geometria dos volumes pedológicos em Espodosolos, Cambissolos e Argissolos paranaenses, nos municípios de Paranaguá, Pinhais e Maringá, respectivamente, como indica a Figura 2. Estas classes de solos, respectivamente, têm sua gênese ligada aos sedimentos inconsolidados provenientes do Cenozóico nas Planícies Litorâneas e Primeiro Planalto do Paraná, e dos derrames basálticos do Mesozóico na Bacia Sedimentar do Paraná, inserida do terceiro planalto paranaense.

Os solos imageados foram escolhidos devido às suas propriedades físico-químicas e horizontes contrastantes com o propósito de avaliar o método de prospecção eletromagnética de solos com o uso de uma técnica geofísica, e com o intuito de compreender o funcionamento do Georradar no que diz respeito aos parâmetros a serem adotados em uma prospecção de solos em perfil.

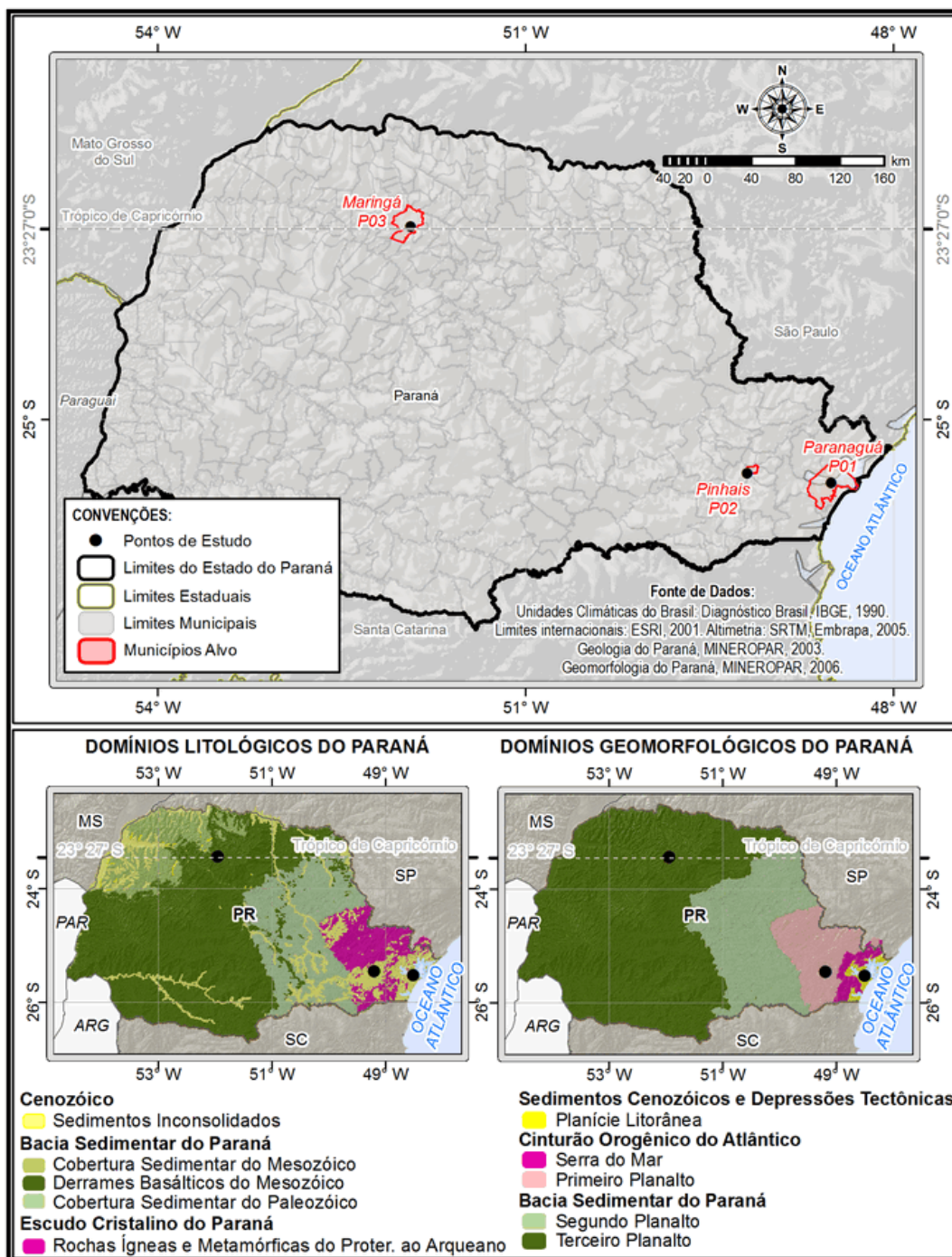


Figura 2 – Localização das áreas de aplicação do mapeamento eletromagnético. (Org. Orestes Jarentchuk Junior).

2. GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO ESTUDO PEDOLÓGICO

A viabilidade da utilização dos recursos dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) em trabalhos de mapeamento é legitimada pela possibilidade de análise da informação espacial em diversas aplicações, dentre elas a pedologia, permitindo o cruzamento de diferentes informações temáticas a partir de sistemas automatizados.

Para Moura (2000), o SIG trata-se de um instrumento de elaboração informatizada que permite coleta, gestão, análise e representação automatizada de dados georreferenciados, o qual traz ferramentas que permitem reduzir custos financeiros e de tempo dispensados para a manipulação de dados, assim como contribui com significativa qualidade e precisão nos resultados obtidos, como bem coloca Silva *et al.* (2007).

Dentre as geotecnologias relacionadas ao SIG, ou equipamentos para a aquisição de dados georreferenciados, e que são amplamente empregados no auxílio de mapeamentos pedológicos, tem-se o sensoriamento remoto enquanto técnica para mapeamentos regionais e preliminares, com base no processamento digital de imagens de satélite ou fotointerpretação.

Este método fornece importantes informações a respeito da distribuição dos solos a partir de elementos ou fenômenos na superfície do terreno quando relacionados a fatores que regem a gênese dos solos na paisagem, como a geologia, a geomorfologia, a cobertura vegetal e o comportamento hidrológico.

Outras geotecnologias, porém com usos amplamente difundidos em estudos geológicos para fins de exploração e ambientais, e que têm bastante potencial para aplicação em estudos pedológicos, sobretudo aplicados em mapeamentos de detalhe, tratam-se de instrumentos ligados a métodos geofísicos de prospecção. Estes métodos permitem a caracterização em subsuperfície de propriedades dos solos em detalhe, tais como a profundidade, o teor de umidade e a distribuição contínua de horizontes pedológicos.

Equipamentos aplicados a estudos geofísicos, como o radar de penetração do solo, podem ser bastante úteis para prospecções ao longo de topossequências e auxiliar os pesquisadores a definirem o ponto de coleta de amostras adequado ou mais significativo conforme dados fornecidos pelo

instrumento, assim como podem representar uma ferramenta para auxiliar em trabalhos de mapeamentos ultradetalhados de solos.

2.1. MÉTODOS DE PROSPECÇÃO REMOTA

De maneira geral, o sensoriamento remoto é descrito com uma técnica de aquisição de dados sem o contato direto entre o sensor e o objeto, sendo a aquisição desses dados possível a partir da detecção da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos alvos na superfície terrestre (MORAES, 2002; FLORENZANO, 2002; JENSEN, 2009).

No entanto, percebe-se que a raiz desse conceito parece reduzir o campo de operação do sensoriamento remoto, desprezando outras fontes de energia potenciais, tais como as derivadas de anomalias gravitacionais e propagação de ondas sísmicas e acústicas. Assim como informações de subsuperfície, princípios físicos e objetos de estudo que regem os trabalhos de prospecções geofísicas. Esse pensamento é fortalecido com a definição colocada por Crósta e Souza Filho, a qual determina que o sensoriamento remoto seja

um ramo da ciência que aborda a obtenção e a análise de informações sobre materiais (naturais ou não), objetos ou fenômenos na superfície da Terra a partir de dispositivos situados à distância dos mesmos. Tais dispositivos recebem o nome de sensores, cuja função é receber e registrar informações provenientes desses materiais, objetos ou fenômenos (genericamente denominados de alvos), para posterior processamento e interpretação por um analista (CRÓSTA & SOUZA FILHO, 1997, p. 10).

Em razão desse relativo consenso sobre as técnicas de sensoriamento remoto, temos em abundância uma literatura que dispõe de técnicas, tipos de sensores e plataformas, e explicações sobre a interação entre o comportamento das ondas eletromagnéticas e a matéria, atestando que o sensoriamento remoto é efetivamente definido como uma técnica de aquisição de dados superficiais.

Tal entendimento distancia as técnicas de prospecção remota definidas como métodos geofísicos, ainda que em referência a Swain & Davis (1978,

apud CENTENO, 2004), considera-se que o sensoriamento remoto vai além da definição comum. E trata na verdade de procedimentos de aquisição de imagens a partir da identificação das respostas de interação da matéria frente à propagação não apenas de ondas eletromagnéticas, mas também sísmicas e acústicas, assim como da leitura de flutuações nos campos gravitacionais que emanam de um determinado alvo de interesse.

Essa lógica deixa explícita a compreensão de que alguns métodos geofísicos poderiam ser enquadrados como técnicas de sensoriamento remoto, tendo em vista se tratar também de métodos de aquisição de dados sem o contato direto entre o sensor e o objeto alvo, ainda que alguns equipamentos sejam aplicados bastante próximos ou em contato com a superfície do terreno e que o conceito de geofísica seja mais amplo.

Cabe salientar que os métodos geofísicos correspondem a técnicas aplicadas especificamente ao reconhecimento e prospecção de subsuperfície, ao contrário dos sensores largamente utilizados e que são destinados ao imageamento e monitoramento da distribuição espacial dos fenômenos em superfície.

A discussão sobre a conceituação e considerações acerca de métodos geofísicos constituírem ou não sistemas de sensoriamento remoto não faz parte do escopo do trabalho aqui desenvolvido e tampouco subtrai a legitimidade de seus resultados. Mas merece a certo modo um parêntese sobre a forma de como é considerada essa relação entre técnicas de aquisição de dados em geociências. Assim, fica explícita nessas linhas a aceitação dessa direta relação, entendendo, é claro, que nem todos os métodos geofísicos têm em seus princípios de funcionamento a prática da aquisição de dados remotamente ou à distância.

No que diz respeito à aplicação de sistemas de sensoriamento remoto em estudos pedológicos, pode-se fazer o uso de dois diferentes métodos segundo o funcionamento dos sensores em relação à aquisição de dados. Os dois métodos de aquisição são destacados por Robson *et al.* (2008) e detalhados por Centeno (2004), como aqueles classificados em sensoriamento remoto passivo e ativo, podendo ser imageadores ou não imageadores.

Os sensores passivos são aqueles capazes de registrar as interações da energia eletromagnética entre o alvo e uma fonte natural (sol) ou até mesmo

a energia que emana do próprio alvo, seja ela elétrica, magnética ou gravitacional, constituindo uma fonte potencial. Diferentemente, os sensores ativos necessitam da indução da interação entre a energia eletromagnética e o alvo, e para tanto emitem pulsos que são absorvidos ou refletidos pela matéria.

Em relação à forma de armazenamento de dados, os sensores imageadores são assim definidos pela capacidade de produzir uma imagem ou fotografia como produto do registro de dados da superfície mapeada. De outra forma, os sensores não imageadores armazenam os dados mapeados em forma de gráficos ou tabelas.

Dentre os sensores passivos aplicados aos estudos pedológicos em mapeamentos de detalhe Robson *et al.* (2008) destacam o radiômetro, o qual tem a finalidade de captar a radiação natural dos solos. O autor explica que essa radiação é função da temperatura do solo associada às suas propriedades físicas, tais como a permissividade dielétrica, e também da configuração da superfície do terreno, no caso a rugosidade superficial.

2.2. MÉTODOS GEOFÍSICOS

A possibilidade de estudos e prospecções pedológicas a fim de determinar as propriedades físico-químicas do solo, ou até mesmo reconhecer a geometria dos volumes de solos em profundidade, a partir da aplicação de um conjunto de instrumentos específicos com a obtenção de dados em tempo real, mesmo que necessite de um processo de tratamento desses dados posteriormente, torna vantajosa e prática a utilização de métodos geofísicos.

O maior interesse na utilização de métodos geofísicos está na aplicação de técnicas reconhecidas como não destrutivas, isto é, os equipamentos empregados em prospecções geofísicas permitem o acesso aos dados em subsuperfície indiretamente, sem a necessidade de infligir impactos maiores à paisagem, como por exemplo, a abertura de trincheiras para o reconhecimento da configuração das camadas sobrepostas de solos em perfil.

A geofísica pode ser definida, segundo a Sociedade Brasileira de Geofísica (SBGf, 2012), como a ciência voltada aos estudos da subsuperfície

da Terra com base em princípios físicos aplicados em prospecções tomadas a partir da superfície terrestre e, conforme introduz Parasnis, tem seus objetivos ampliados e vão

muito além da prospecção de óleo, mineral e água, problemas de arqueologia, engenharia civil, hidrogeológicos e ambientais, não esquecendo a investigação de locais para a gestão de resíduos de combustíveis nucleares (PARASNIS, 1996, p. xi).

De maneira geral, os métodos geofísicos são agrupados em dois grandes conjuntos que descrevem a natureza de aquisição de dados, a exemplo dos sensores remotos ativos e passivos.

Kearey *et al.* (2009) identificam os métodos de aquisição geofísicos como aqueles que se utilizam de propriedades naturais do planeta, ou simplesmente denominados potenciais, como flutuações nos campos gravitacionais, magnéticos, elétricos e eletromagnéticos terrestres; e aqueles que necessitam de fontes artificiais geradoras de campos elétricos ou eletromagnéticos no local de interesse.

2.2.1. Métodos Potenciais

Com relação aos métodos potenciais podemos listar a Gravimetria e a Magnetometria como técnicas de aquisição de dados em subsuperfície a partir da captação de sinais naturais terrestres. Resumidamente, a Gravimetria, a partir do campo gravitacional da Terra, reconhece as diferenças entre as densidades das rochas em subsolo associando com a profundidade em que se encontram e as dimensões dos corpos em estudo (ROSA, 2009).

Destaca-se a possibilidade de reconhecimento de rochas ígneas e intrusões salinas, assim como possibilita a delimitação de lineamentos e domínios estruturais, tais como falhas, fraturas e dobras.

A Magnetometria tem seu funcionamento ligado ao reconhecimento de variações na intensidade do campo magnético terrestre, o campo geomagnético (ROSA, 2009), em função das propriedades magnéticas das rochas em subsuperfície, destacando-se também a possibilidade em determinar o posicionamento e dimensões de corpos de origem ígnea.

2.2.2. Métodos de Fontes Artificiais

Levando em consideração o escopo do presente trabalho, a concentração dos esforços em definir e apresentar os métodos geofísicos existentes tem como foco os métodos de fontes artificiais, sobretudo aqueles que se baseiam na indução de campos eletromagnéticos. Nesse sentido, esse capítulo tem como objetivo descrever e caracterizar algumas aplicações de métodos de prospecção indireta em especial para o reconhecimento de propriedades do solo.

Em relação a estudos pedológicos, Robson *et al.* (2008) indicam duas categorias de métodos geofísicos que permitem a determinação de características dos solos, identificando-os de acordo com as propriedades físicas que regem seu funcionamento.

A primeira categoria tem seu funcionamento atrelado à condutividade elétrica do solo, com base na corrente de resistividade direta e indução eletromagnética. A segunda categoria é caracterizada por ter seu funcionamento ligado à determinação do tempo de propagação de ondas eletromagnéticas em função de seus comportamentos frente às características ou composição dos solos.

Um método bastante empregado em estudos do solo, e que nos remete à categoria que opera segundo a condutividade elétrica do meio, refere-se à técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR – *Time Domain Reflectometry*). Este método trata da determinação da permissividade dielétrica¹ pontual de determinado tipo de solo a partir do reconhecimento do tempo de resposta do pulso eletromagnético emitido pelo equipamento (McCLYMONT *et al.*, 2010).

Para essa técnica, o tempo de resposta é diretamente afetado pelas características de condutividade elétrica do meio, as quais interferem na capacidade de reflexão ou atenuação do sinal². Esse método é empregado para a determinação do conteúdo de água existente no solo a partir da definição da constante dielétrica como explica Santos *et al.* (2010), sendo

¹ Essa e outras propriedades físicas ligadas ao comportamento das ondas eletromagnéticas em subsuperfície são descritas em capítulo específico sobre a prospecção eletromagnética do solo.

² Os parâmetros que interferem no comportamento de propagação das ondas eletromagnéticas são descritas em tópicos posteriores.

necessário, portanto, calibrações específicas de acordo com o tipo de solo em análise.

Exemplificando a segunda categoria indicada por Robson *et al.* (2008), a técnica usualmente empregada refere-se ao Georradar, em que se tem a indução de um campo eletromagnético com base nas propriedades de condutividade elétrica dos alvos e sua influência no comportamento das ondas eletromagnéticas. Essa propriedade é determinada em prática pelo sinal de resposta recebido pelo equipamento condicionado às características dielétricas do conteúdo da água no solo e outros minerais.

Holden (2004) com o objetivo de reconhecer o sentido de fluxo do escoamento subsuperficial e a conectividade entre os dutos no solo (*pipes*) utilizou como ferramenta o Georradar, em condições de campo impostas pelos atributos físicos dos solos predominantes nas áreas pesquisadas. As antenas empregadas para o estudo em questão operam com frequências centrais de 100 e 200 MHz, as quais permitem profundidades de penetração média de 0 a 15m e 0 a 9m, respectivamente.

Naquele momento, compreendendo as propriedades de condutividade elétrica dos materiais em subsuperfície, em particular da água e dos solos orgânicos e franco-arenosos, as quais influenciam no comportamento das ondas eletromagnéticas emitidas e recebidas pelo equipamento, Holden (2004) pretendeu imagear as mudanças de reflectância devido à passagem do fluxo de escoamento com a adição de uma solução salina ao longo do tempo em que o Georradar ficou estacionado. Assim, a passagem de fluxo pôde ser observada a partir da identificação do contraste entre a condutividade elétrica da água em sua condição natural e enquanto carregada com o traçador.

Para estimar a concentração apropriada do traçador salino exigiu-se também a estimativa do volume de água da rede de *pipes* e da condutividade natural do ambiente imageado, de maneira a compreender que na área com solo turfoso, em que a rede de águas subsuperficiais apresenta baixa condutividade, uma solução salina com baixa concentração é suficiente para a obtenção da resposta desejada.

Diferentemente, na área com solo franco-arenoso, com água apresentando característica de maior condutividade, necessita-se da duplicação da concentração do traçador. Esse é um exemplo prático e

indicador da eficiência do equipamento para a determinação de uma propriedade ou condição do solo em profundidade.

Em alguns casos a aplicação de um único método geofísico não é o suficiente para obter uma avaliação satisfatória da área de estudo conforme o objetivo da pesquisa, isto devido às limitações de prospecções a que estão sujeitas os equipamentos em função das propriedades físicas envolvidas e das características do meio em subsuperfície.

Para tanto, alguns métodos geofísicos podem ser empregados em conjunto considerando suas particularidades relacionadas às propriedades físicas atreladas ao funcionamento dos equipamentos e à profundidade e resolução de imageamento.

McClymont *et al.* (2010) demonstram a aplicação da integração de métodos geofísicos para caracterização física de um depósito de tálus como subsídio à compreensão do comportamento hidrogeológico em encostas.

Neste estudo, os métodos geofísicos foram empregados para a determinação das estruturas internas, propriedades físicas do cone de detritos e profundidade da rocha matriz, incorporando a utilização do Georradar, da Tomografia de Resistividade Elétrica e da Sísmica por Refração, com a compreensão das propriedades físicas que regem o funcionamento de cada equipamento utilizado.

Enquanto os levantamentos por meio de Georradar e Tomografia Elétrica operam em função da permeabilidade magnética, permissividade dielétrica e condutividade elétrica, a sísmica por refração opera a partir de parâmetros elásticos e em função da densidade da matéria em subsuperfície.

As seções obtidas com o uso do Georradar foram tomadas para o reconhecimento da estrutura geológica do depósito de tálus segundo o comportamento das ondas eletromagnéticas emitidas pelo equipamento nas camadas do cone de detritos, utilizando antena com frequência central de 50 MHz, própria para prospecções em profundidades de até 50m, porém com baixa resolução de imageamento.

Paralelamente, foram tomadas seções de Tomografia Elétrica coincidentes com as seções de Georradar a fim de melhorar a resolução do imageamento próximo à superfície para a identificação de mudanças na

quantidade de água no subsolo e na geometria da porosidade e fraturas das rochas.

Com esse método, a resistividade elétrica é compreendida como característica de resistência do fluxo de corrente elétrica de determinado volume de material em prospecção remota e, como colocado por Kearey *et al.* (2009), a porosidade do meio impõe controle sobre a resistividade das rochas, de maneira que a resistividade é dada como sendo inversamente proporcional ao gradiente de porosidade, textura e da distribuição dos poros.

Outros fatores relacionados ao comportamento elétrico em rochas dizem respeito à resistividade dos fluidos intersticiais, bem como aos processos decorrentes do contato da superfície de uma matriz rochosa e os fluidos (MIRANDA *et al.*, 2000).

Por fim, uma seção de sísmica por refração, coincidente com uma seção de Georradar e Tomografia Elétrica, com uma sequência de pontos ou tiros ao longo de seu alinhamento, foi efetuada. O intuito foi de caracterizar o depósito sedimentar da encosta compreendendo sua capacidade de discriminar os materiais rochosos com baixas e altas velocidades de propagação da energia acústica, sendo a capacidade de propagação de ondas acústicas dependente da coesão, dimensão e geometria dos materiais em subsuperfície.

Nesse sentido, entende-se a similaridade entre os métodos geofísicos fundamentados no comportamento de propagação das ondas eletromagnéticas das categorias de levantamento indicadas por Robson *et al.* (2008), com os métodos geofísicos baseados em induções sísmicas (ondas mecânicas). Na realidade, os meios de interpretação dos dados eletromagnéticos são adaptações daqueles desenvolvidos essencialmente para a leitura de dados sísmicos. A diferença, no entanto, está na resolução de imageamento e profundidade de penetração do sinal emitido.

2.2.3. Características do Sistema Georradar

O Georradar ou Radar de Penetração do Solo (GPR – *Ground Penetrating Radar*), é uma tecnologia aplicada a estudos geofísicos e trabalhos de prospecção subsuperficial. Trata-se de uma tecnologia relativamente recente que tem se desenvolvido a partir da década de 1970³ e destinada em um primeiro momento a investigações geológicas nas geleiras do Ártico e Antártica (AMPARO, 2006).

Atualmente a utilização do Georradar é bastante difundida nos campos da geotecnia, arqueologia, hidrogeologia, engenharia civil e estudos ambientais (PORSANI *et al.*, 2004). No campo da pedologia, raros são os estudos, sobretudo no Brasil, que não envolvam exclusivamente a avaliação de contaminação hidrológica, especialmente em passivos ambientais de postos de combustível.

A aplicação do Georradar é uma técnica de investigação subsuperficial não destrutiva compondo um método de sondagem indireta, isto é, não necessita do rompimento da superfície com a abertura de trincheiras ou até mesmo perfurações para o reconhecimento do subsolo.

Outras vantagens podem ser listadas, tais como a observação instantânea dos dados pelo ecrã do equipamento, mapeamentos contínuos de maneira a substituir a elaboração de perfis sem a inferência de informações a partir de prospecções pontuais, permitindo posteriormente a locação de sondagens diretas em um alvo previamente identificado, reduzindo significativamente o tempo e custo da execução do trabalho.

Tecnicamente, a composição do Georradar é dada por um equipamento de controle que, conforme o fabricante, traz embutidos *softwares* específicos para a recepção dos sinais eletromagnéticos e instantânea conversão dos dados brutos em um radargrama.

Esse painel de controle, onde se tem o ecrã de visualização dos dados levantados e que permite a configuração de imageamento conforme o objetivo do estudo está conectado às antenas por meio de cabos de fibra ótica. As

³ Trata-se do período de maior desenvolvimento da técnica para fins comerciais, pois é sabido que o equipamento foi bastante utilizado durante o período da Segunda Guerra Mundial.

antenas podem ou não apresentar um envólucro blindado para reduzir a interferência de sinais e ondas de rádio externas.

Com relação à disposição das antenas emissora e receptora do Georradar, existem duas configurações usais para a tomada de dados, com distâncias fixas e variáveis.

O método do espaçamento fixo (*common offset*) refere-se à configuração de distância fixa entre as antenas durante o levantamento, a qual atualmente pode ser encontrada em plataformas móveis facilitando sua utilização.

A configuração de distâncias variáveis refere-se às técnicas Ponto Médio Comum (*Common Mid Point - CMP*) e Reflexão e Refração de Grande Ângulo (*Wide Angle Reflection And Refraction - WARR*). Estas técnicas são úteis para a aquisição de dados a respeito das velocidades de propagação das ondas eletromagnéticas em subsuperfície conforme a profundidade de penetração, esta condicionada à alteração da distância entre as antenas durante o levantamento. Enquanto na técnica WARR apenas uma antena (emissora) é deslocada progressivamente durante a aquisição de dados, para a técnica CMP as duas antenas são deslocadas em sentidos opostos.

2.2.3.1. Princípios de Funcionamento do Georradar

A emissão do sinal é caracterizada por um pulso de curta duração (nanosegundos – ns) e a resposta do sinal, condicionada ao tempo de retorno da onda eletromagnética, está associada com a configuração dos parâmetros no painel de controle.

Simplificadamente, o método consiste em percorrer uma linha alvo com um equipamento emissor de ondas eletromagnéticas considerando frequências centrais que variam entre 1,0 MHz e 2,0 GHz⁴ de acordo a antena utilizada e os objetivos de estudo, as quais influenciam na profundidade de penetração da onda, e obter um radargrama, uma imagem representando o perfil com as

⁴ É possível encontrar diversas faixas de frequências em que operam os equipamentos GPR, dependendo do autor ou período de publicação dos trabalhos científicos ou até mesmo da marca dos equipamentos utilizados.

assinaturas ou respostas eletromagnéticas da subsuperfície, específicas de cada elemento constituinte do subsolo.

É importante salientar que o pulso emitido pelo Georradar toma a forma de um cone⁵ com vértice em seu ponto de emissão (antena) e base em condição crescente conforme a profundidade de imageamento requerida. Por isso, alguns alvos que apresentam assinaturas eletromagnéticas que se destacam em função de sua natureza constituinte são representados no perfil em forma de curvas de reflexão (hipérboles), as quais tem em seu vértice a posição real do objeto imageado.

Logo, o imageamento real não se dá em uma linha vertical, mas sim em um conjunto de dados referentes à determinada área de abrangência desse cone de imageamento. Essa área de imageamento é determinada em função das características elétricas do meio, da constante dielétrica empregada e da profundidade requerida pelo operador de acordo com a antena escolhida.

A Figura 3 ilustra o funcionamento da antena do Georradar com relação ao comportamento de emissão e recepção das ondas eletromagnéticas, enquanto a Figura 4 apresenta um exemplo de radargrama e a Figura 5 demonstra o enquadramento da faixa de frequências de trabalho do Georradar dentro do espectro eletromagnético.

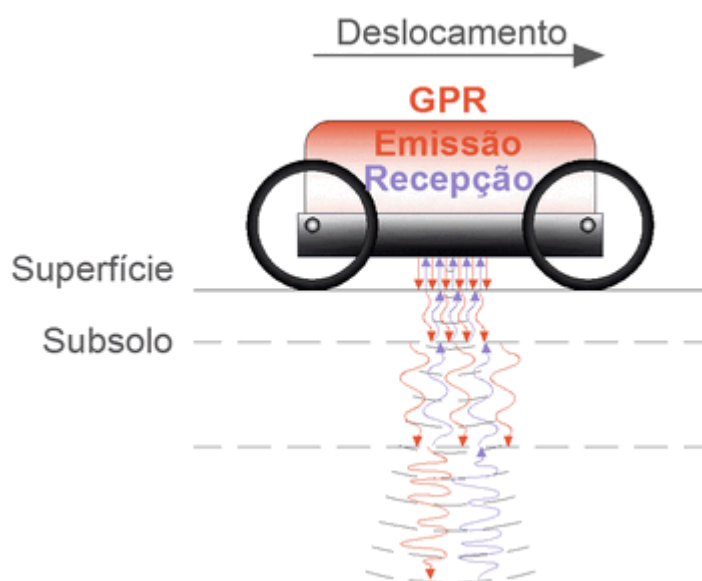


Figura 3 – Representação hipotética de funcionamento de emissão e recepção das ondas eletromagnéticas em subsuperfície pelo Georradar.

⁵ O detalhamento da forma de emissão e recepção dos pulsos eletromagnéticos é apresentado em tópico apropriado, o qual descreve as condições de propagação das ondas eletromagnéticas em subsuperfície.

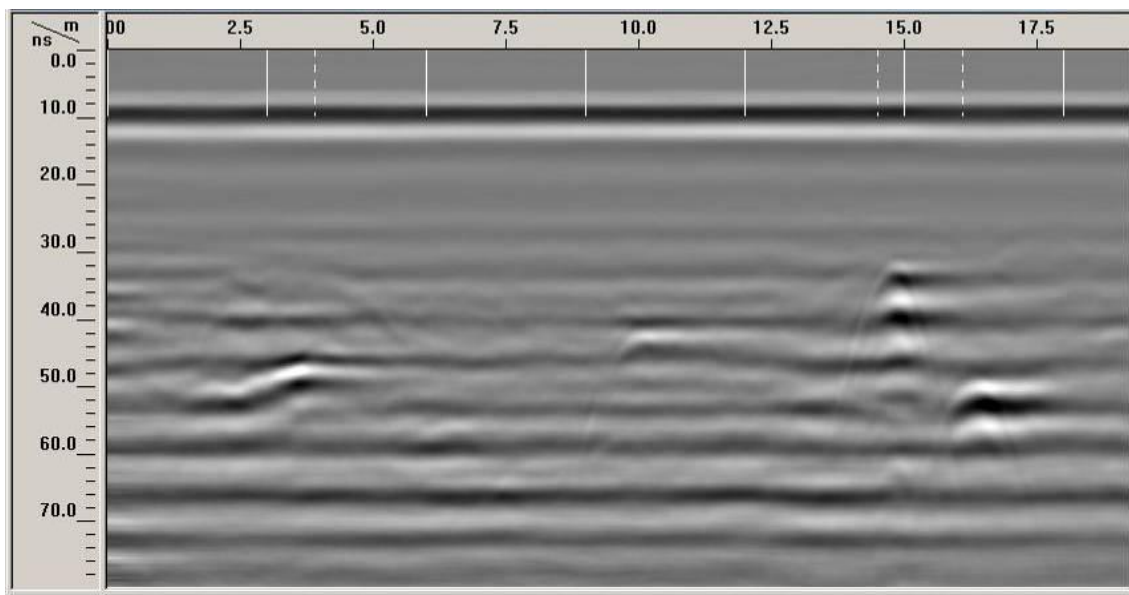


Figura 4 – Exemplo de radargrama obtido pelo Georradar.

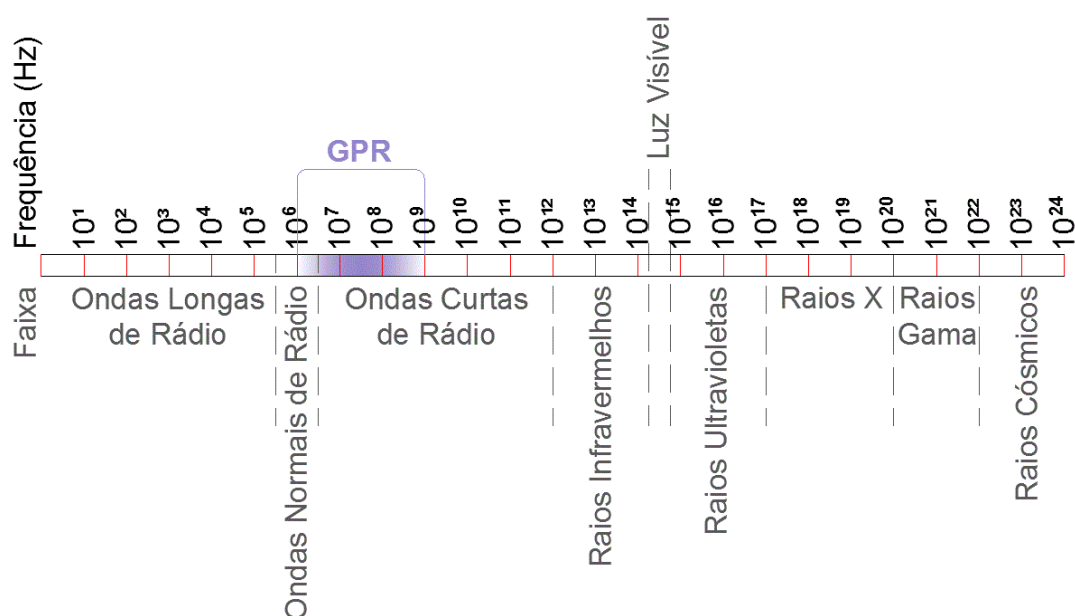


Figura 5 – Posição da frequência de operação do Georradar no espectro eletromagnético.

Uma parte do sinal emitido reflete segundo as propriedades elétricas do meio, a qual é recebida e pré-processada pela unidade de controle. O radargrama é, portanto, resultado dos sinais refletidos pelas propriedades dielétricas dos constituintes do subsolo e recebidos pelo Georradar, correspondendo à determinação do tempo de fluxo das ondas eletromagnéticas emitidas continuamente pela antena e refletidas.

Porsani (1999) aponta que as ondas eletromagnéticas quando emitidas sofrem interferência do material constituinte do subsolo, induzida pelas especificidades das constantes dielétricas dos alvos, assim como pela porosidade da massa superficial e seu teor de umidade, capaz de imprimir diferentes respostas à antena receptora devido ao sinal refletido.

Assim, a informação captada pelo equipamento nada mais é do que a diferença entre as velocidades de emissão e recepção do sinal de acordo com a natureza de cada objeto imageado, simulando um dado sísmico, porém com resolução superior.

Como visto, a profundidade de penetração do sinal eletromagnético, bem como seu comportamento em subsuperfície, é influenciada diretamente pelas propriedades elétricas dos materiais, condutividade e permissividade elétrica (constante dielétrica).

Ainda que as antenas existentes sejam configuradas para o imageamento em determinadas profundidades conforme a frequência central de seu emissor, a natureza do solo interfere significativamente na velocidade das ondas eletromagnéticas e na variabilidade de penetração do sinal.

Nesse sentido, entendendo a relação entre a frequência central e profundidade de penetração média do sinal, deve-se escolher a antena adequada às especificidades do objeto de estudo. O Quadro1 apresenta as opções de antenas comercializadas e suas relações com as profundidades de alcance e aplicações preferencializadas.

Frequência Central	Profundidade de Penetração Média	Aplicações
2600 MHz	0 a 0,3 m	Inspeções em Concreto
1600 MHz	0 a 0,5 m	Inspeções em Concreto
900 MHz	0 a 1,0 m	Inspeções em Concreto e Identificação de Vazios
400 MHz	0 a 4,0 m	Engenharia, Ambiental e Identificação de Vazios
270 MHz	0 a 6 m	Geologia, Engenharia, Ambiental, Arqueologia e Pedologia
200 MHz	0 a 9 m	Geologia, Engenharia, Ambiental, Arqueologia e Mineração
100 MHz	0 a 15 m	Geologia, Ambiental, Arqueologia e Mineração
16 a 80 MHz	0 a 50 m	Geologia
2,0 GHz	0 a 0,75 m	Inspeção de Pavimentação de Estradas e Lances de Pontes
1,0 MHz	0 a 0,9 m	Inspeção de Pavimentação de Estradas e Lances de Pontes

Quadro1 - Antenas de Georradar: frequências centrais, profundidades médias e aplicações.
Fonte: GSSI / Alpha Geofísica – Brasil (Adaptado).

Barboza (1999) destaca essa relação com a afirmativa de que a profundidade de penetração do sinal emitido é inversamente proporcional à frequência da antena empregada, mas a resolução de imageamento é diretamente proporcional a essa frequência, isto é, quanto maior a frequência maior será a resolução e, conseqüentemente, menor será a capacidade de penetração do pulso eletromagnético.

A configuração dos parâmetros utilizados para atingir os objetivos desse estudo, assim como a caracterização do equipamento empregado e as técnicas de tratamento, pós-processamento e interpretação dos dados, estão explicitadas no tópico que compreende os materiais e métodos adotados para o mapeamento eletromagnético dos solos.

3. PRINCÍPIOS DA PROSPECÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE SOLOS

O primeiro trabalho baseado no método de prospecção subsuperficial a partir da indução de ondas eletromagnéticas com uso de Georradar se deu para mapeamentos voltados à exploração mineral através de trabalhos de Leimbach e Löwy em 1910, com objetivos especificamente relacionados à determinação da profundidade do lençol freático e espessura de jazidas minerais (DANIELS *et al.*, 1988, *apud* HOWE, 2000).

Durante a década de 1970, a partir do avanço da engenharia elétrica, especialmente com o desenvolvimento de instrumentos militares e também voltados para a utilização na exploração espacial, o Georradar passa a ter melhorias em termos de resolução e desempenho para a sua aplicação nas geociências. Tal aplicação tem como base a compreensão das propriedades elétricas de materiais geológicos através de estudos de autores como Olhoeft (1975 e 1987, *apud* ANNAN, 2002), tendo sua aplicação concentrada para a exploração mineral, estudos geotécnicos e reconhecimento arqueológico.

Mas é a partir de 1979 que o uso do Georradar para mapeamentos eletromagnéticos de solos obteve registro de sucesso em aplicações de levantamentos na Flórida, citando os trabalhos desenvolvidos por Benson & Glaccum, e Johnson *et. al.*. (DOOLITTLE & BUTNOR, 2009), graças às propriedades dos materiais constituintes e os marcantes contrastes entre os volumes dos solos daquela região.

E são justamente as propriedades físicas ou químicas dos solos e suas relações com a condutividade elétrica em subsuperfície que regem o comportamento das ondas eletromagnéticas em profundidade. Essas relações permitem ao Georradar o registro das distintas respostas dadas pelos horizontes pedológicos de modo a traduzi-las através da construção dos radargramas. Por sua vez, os radargramas permitem a observação das espessuras desses horizontes graças à representação de intensidades e amplitudes dos refletores em subsuperfície, como coloca Saarenketo (1998).

3.1. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E PROFUNDIDADE DE IMAGEAMENTO

De maneira a esmiuçar a relação entre a condutividade elétrica dos materiais que compõem os solos e a profundidade de imageamento, embutida nas linhas anteriores, permitindo a compreensão dos dados fornecidos pelo Georradar, faz-se necessário entender algumas propriedades físicas inerentes às ondas eletromagnéticas.

Também devem ser consideradas algumas propriedades físicas e químicas dos solos, as quais regem o comportamento de penetração e reflexão do pulso eletromagnético emitido e recebido pelas antenas do Georradar.

A compreensão dessa relação contribui de maneira a possibilitar a avaliação sobre a eficiência da aplicação do equipamento em estudos pedológicos, sobretudo no que diz respeito aos solos de regiões tropicais

3.1.1. Propriedades Físicas das Ondas Eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas são compostas por dois elementos ondulatórios, que descrevem um movimento senoidal, perpendiculares entre si e à direção de propagação (JENSEN, 2009), como mostra a Figura 6: os campos elétrico (\vec{e}) e magnético (\vec{m}).

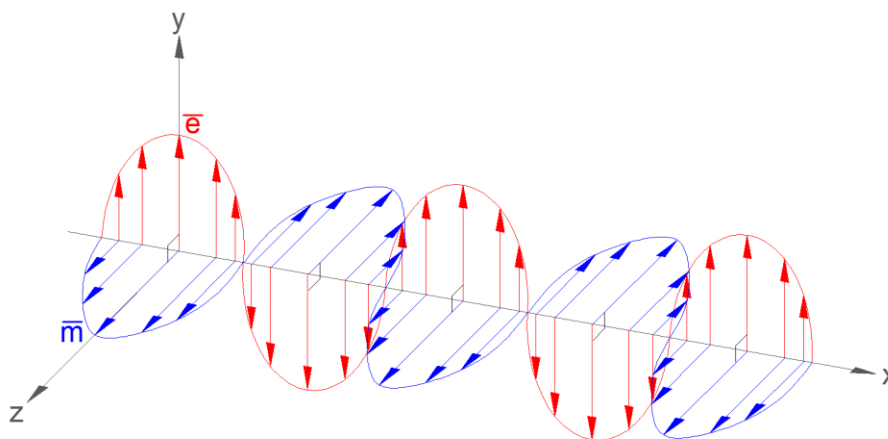


Figura 6 – Configuração de propagação da onda eletromagnética.

A composição de uma onda senoidal é dada pelas seguintes características geométricas no domínio do tempo (JENSEN, 2009; MIGUENS, 2000), como ilustra a Figura 7: amplitude, comprimento de onda, frequência e fase.

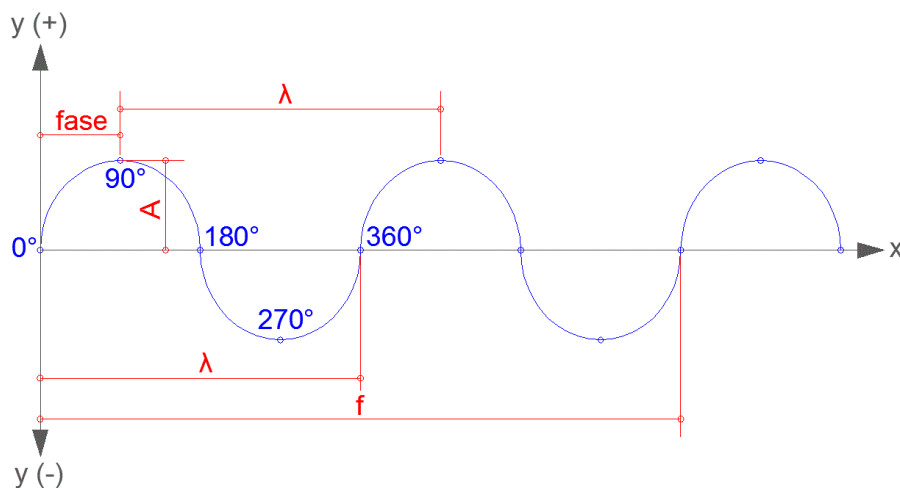


Figura 7 – Composição de uma onda senoidal: frequência hipotética igual a 4.

A amplitude (A) é a distância entre um pico positivo (crista) ou um pico negativo (cavado) em relação à posição inicial no eixo de referência, indicando a intensidade ou força de uma onda.

O comprimento de onda (λ) ou período é a distância entre dois picos positivos ou negativos consecutivos da onda, representando o deslocamento senoidal em fase.

A frequência (f) representa o número de ciclos ou oscilações (período) em determinada unidade de tempo, em fase, pelo qual um pico completa um período em Hertz (Hz, representando a quantificação de períodos por segundo de tempo), sendo o inverso do comprimento de onda, isto é, quanto maior for o comprimento de onda menor será a frequência, expressando-se pela equação 1.

$$f = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

Essa relação entre comprimento de onda e frequência é a base para a composição do espectro eletromagnético.

A fase de uma onda eletromagnética é cada um dos quadrantes senoidais em que um ponto no movimento ondulatório representa a progressão ou desenvolvimento de um período, medida em unidades angulares. Assim, um período corresponde a 360° , indicando um ciclo completo, passando por todos os quadrantes trigonométricos, de maneira que a origem corresponde a 0° , o pico positivo está em 90° , a amplitude completa 180° quando decresce até zero e o pico negativo chega em 270° .

A velocidade de propagação (V) de uma onda eletromagnética é dependente do meio em que interage, sendo assim, a velocidade em um meio qualquer é dada através da equação 2.

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (2)$$

Onde: ε é a permissividade dielétrica em um meio qualquer; e μ é a permeabilidade magnética em um meio qualquer, sendo que $\mu \approx \mu_0$ (μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo).

Compreendendo que a luz se trata de uma onda eletromagnética, Maxwell⁶ define que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo é igual à velocidade da luz (JENSEN, 2009), conforme expõe a equação 3.

$$C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \quad (3)$$

Onde: $C \approx 3,0 \times 10^8$ m/s, enquanto ε_0 e μ_0 correspondem à permissividade dielétrica e permeabilidade magnética no vácuo, respectivamente.

⁶ James Clerk Maxwell, físico e matemático de origem britânica, compilou trabalhos de diversos cientistas acerca de campos elétricos e magnéticos, demonstrando em 1864 as propriedades físicas das ondas eletromagnéticas.

3.1.2. Propagação das Ondas Eletromagnéticas em Subsuperfície

A propagação das ondas eletromagnéticas em subsuperfície tem fundamentação matemática através das equações de Maxwell, segundo Ward & Hohmann (1988), convertidas para formas diferenciais. Para o meio macroscópico são consideradas a Lei de Indução de Faraday (equação 4) e a Lei de Ampère adaptada (equação 5), e para o meio microscópico as Leis de Gauss para eletrostática (equação 6) e para a magnetostática (equação 7), as quais são desprezadas pelo método do georradar.

$$\nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla_x \vec{H} = \vec{J}_c + \vec{J}_d \quad (5)$$

$$\nabla \circ \vec{D} = \rho \quad (6)$$

$$\nabla \circ \vec{B} = 0 \quad (7)$$

Onde: ∇_x e $\nabla \circ$ correspondem aos campos vetoriais rotacionais e divergentes, respectivamente; \vec{E} e \vec{H} correspondem aos campos elétrico (V/m) e magnético (A/m), respectivamente; \vec{B} trata-se do campo de indução magnética (Wb/m²), sendo $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ sua variação em determinado intervalo de tempo ∂t ; \vec{D} é o campo de deslocamento elétrico (C/m³); e ρ refere-se à densidade da carga livre (C/m³).

Além das propriedades das ondas eletromagnéticas, é necessário o conhecimento acerca das propriedades de propagação eletromagnética dos meios em subsuperfície. Thomas *et al.* (2007) destacam dois parâmetros eletromagnéticos importantes em prospecções com o uso do Georradar, os quais determinam o comportamento do sinal e sua velocidade de propagação.

O primeiro se refere à atenuação do sinal, que descreve uma descendência conforme se aumenta a profundidade de imageamento, e o segundo trata da velocidade do sinal, elemento que define a profundidade de reflexão.

Esses parâmetros estão associados às propriedades físicas das ondas eletromagnéticas, tais como a permeabilidade magnética, a permissividade dielétrica e a condutividade elétrica dos materiais que compõem o meio de propagação Saarenketo (2006).

De maneira geral, alguns materiais isoladamente apresentam as constantes dielétricas, velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, índice de atenuação e condutividade conforme expõe o Quadro 2.

Material	k	Velocidade (m/ns)	Atenuação (dB/m)	Condutividade elétrica (mS/m)
Ar	1	0,3	0	0
Água destilada	80	0,033	0,002	0,01
Água salobra	80	0,01	0,1	300000
Granito	4 a 6	0,13	1000	0,01 a 1
Gelo	3 a 4	0,16	0,01 a 1	0,01
Calcário	4 a 8	0,12	0,01	0,5 a 2
Folhelhos	5 a 15	0,09	0,4 a 1	1 a 100
Silte	5 a 30	0,07	1 a 100	1 a 100
Argilas	5 a 40	0,06	1 a 300	2 a 1000
Areia Seca	3 a 5	0,15	0,01	0,01
Areia Saturada	20 a 30	0,06	0,03 a 0,3	0,1 a 1

Quadro 2 – Constantes dielétricas (k), velocidade, atenuação e condutividade elétrica dos materiais (adaptado de Davis & Annan, 1989).

3.1.2.1. Permeabilidade Magnética (μ)

A permeabilidade magnética (μ) é a capacidade de armazenamento de energia de um material em função de uma indução magnética, o que em geral, é desprezado na aplicação do Georradar em mapeamentos pedológicos devido à incipiente variação da permeabilidade dos materiais que compõem o subsolo quando comparadas à permeabilidade dos espaços livres ($\mu \approx \mu_0$), sendo consideradas, portanto, apenas as propriedades elétricas dos solos (SAARENKETO, 1998).

3.1.2.2. Permissividade Dielétrica (ϵ)

A permissividade dielétrica (ϵ) é a capacidade de um material em armazenar cargas elétricas por meio da polarização ou separação de cargas como resposta à indução de uma corrente elétrica em trânsito pelo subsolo. A permissividade dielétrica é dada pela relação entre a energia armazenada e a energia dissipada, sendo o resultado dado como a permissividade relativa de um meio, ou expresso por um valor adimensional definido como constante dielétrica (k) (THOMAS *et al.*, 2007).

De maneira simplificada, a constante dielétrica também pode ser descrita como a relação entre a permissividade dielétrica de um meio e do vácuo, conforme a equação 8 (BORGES, 2002).

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (8)$$

Onde: ϵ é a permissividade dielétrica do meio e ϵ_0 é a permissividade dielétrica do vácuo (sendo $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)⁷.

Materiais que não conduzem energia elétrica aos quais são aplicados campos elétricos através de pulsos eletromagnéticos são induzidos a polarização, sendo denominados segundo Alonso & Finn (1992, *apud* HOWE, 2002) de materiais dielétricos.

Robinson *et al.* (2008) apontam que a constante dielétrica da água é a maior em comparação com os outros materiais que compõem o solo por apresentar um grande dipolo permanente, considerando a posição e ângulo dos átomos de hidrogênio em relação ao de oxigênio. Tal situação implica na grandeza da permissividade dielétrica de determinado tipo de solo de acordo com a quantidade de água armazenada.

⁷ Um capacitor de 1 farad pode armazenar uma carga que varia entre 1C e 1V (1 faraday = 1C/V) (HALLIDAY *et. al.*, 2012).

É importante salientar que, quando da utilização de um Georradar, a velocidade de um pulso eletromagnético varia em função da profundidade de penetração e distância dos refletores, dificultando definir uma constante dielétrica, até por que a constante dielétrica medida⁸ *in situ* é a média das permissividades dielétricas dos materiais constituintes daquele meio e fortemente influenciada pela condição de umidade em que se encontra esse meio.

3.1.2.3. Condutividade Elétrica (σ)

A condutividade elétrica (σ) refere-se à capacidade de um determinado material em conduzir cargas elétricas descrevendo, portanto, um condicionamento de fluxo (corrente), o qual pode se dar por meio de condução ou deslocamento de acordo com o material constituinte.

Howe (2000) indica que uma corrente de condução é introduzida quando na aplicação de um campo elétrico, em um meio qualquer, as moléculas inertes são induzidas ao movimento a partir da colisão com moléculas introduzidas (Figura 8).

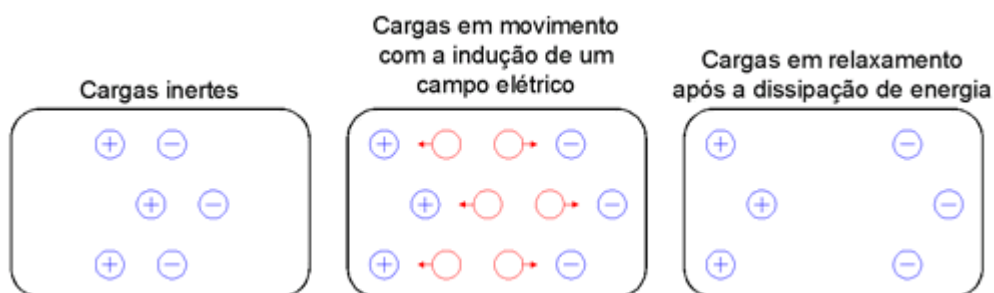


Figura 8 – Comportamento das cargas em função da aplicação de uma corrente de condução (adaptado de Annan, 2001).

A energia não é armazenada, mas sim diretamente dissipada em forma de calor. Tal corrente elétrica é dependente do grau de condutividade dos materiais, principalmente em função do teor de argila e umidade.

⁸ A constante dielétrica pontual pode ser medida através de instrumentos específicos, como o TDR, a partir do índice de umidade do local investigado.

Já as correntes de deslocamento, ou de polarização, descrevem uma condição em que as moléculas sofrem deslocamento em função do campo elétrico induzido até certo ponto em que armazenam energia ao máximo e voltam a se mover em direção à posição inicial a partir da conversão da energia armazenada em calor (Figura 9).



Figura 9 – Comportamento das cargas em função da aplicação de uma corrente de deslocamento (adaptado de Annan, 2001).

Especificamente para o método do Georradar, o condicionamento de fluxo de energia se dá por meio de deslocamento de corrente ou de polarização.

3.1.2.4. Índice de Atenuação (α)

Oliveira (2001) explica o processo de aquisição de informações pelo Georradar através da relação entre as correntes elétricas de condução e deslocamento, ambas originadas pelas interações dos comportamentos elétrico e magnético característicos de cada material componente da subsuperfície.

Essa condição implica em dissipação de energia no subsolo em forma de calor e, conseqüentemente, interfere no deslocamento das ondas eletromagnéticas de maneira a atenuar o sinal em profundidade, cujo índice de atenuação (α) pode ser definido através da equação 9 (DAVIS & ANNAN, 1989).

$$\alpha = 1,636 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sqrt{k}} \right) \quad (9)$$

Onde: α é o índice de atenuação expresso em dB/m; σ é a condutividade elétrica do meio; e k é a constante dielétrica do meio.

3.1.2.5. Velocidade de Propagação (V)

Lembrando que a permeabilidade magnética é desconsiderada, torna-se possível simplificar então a determinação da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas conforme a equação 10.

$$V = \frac{C}{\sqrt{k}} \quad (10)$$

Onde: V é dada em m/ns, $C \approx 3,0 \times 10^8$ m/s (0,3 m/ns) e k é a constante dielétrica do meio de propagação.

3.1.2.6. Pegada de Imageamento

Um ponto importante a se observar está na maneira como o Georradar emite os feixes eletromagnéticos. Howe (2000) explica que a onda eletromagnética se propaga descrevendo elipses (Figura 10) que ascendem suas dimensões a partir do ponto de emissão (antena) em direção ao subsolo, crescendo em profundidade.

Contudo, a recepção da resposta não se dá em um ponto como o de emissão, e sim abrangendo determinada área abaixo do equipamento, a que se denomina de pegada, ou Zona de Fresnel (XAVIER NETO & MEDEIROS, 2005), descrevendo um volume de imageamento segundo a forma de um cone elíptico.

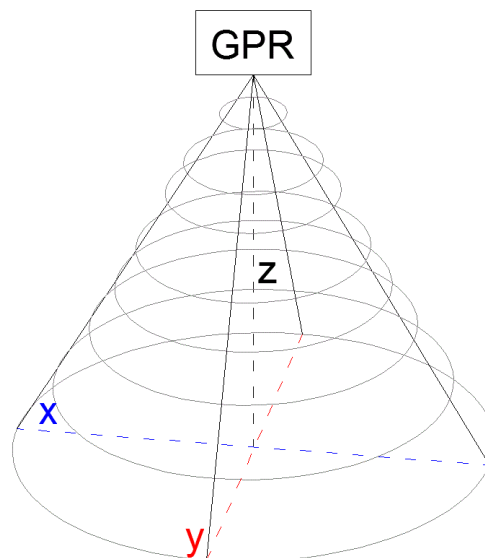


Figura 10 – Configuração vetorial da pegada ou cone de imageamento (adaptado de Howe, 2000).

Esta pegada tem suas dimensões dependentes do comprimento de onda, da posição em profundidade de um refletor qualquer e também da constante dielétrica, como demonstram as equações abaixo (equações 11, 12 e 13) apresentadas por Annan (2001).

$$x = \left(\frac{\lambda}{4} \right) + \left(\frac{z}{\sqrt{k-1}} \right) \quad (11)$$

$$y = \frac{x}{2} \quad (12)$$

$$V = \frac{1}{3(\pi \cdot x \cdot y \cdot z)} \quad (13)$$

Onde: x e y representam os raios máximos da base da pegada; z é a profundidade em que se encontra um refletor qualquer; e V é o volume de imageamento.

A pegada de imageamento tem implicações sobre as resoluções vertical e horizontal de aquisição de dados, as quais estão diretamente ligadas à frequência de operação de determinada antena e à largura do feixe eletromagnético, respectivamente.

Em razão dessa forma de propagação dos pulsos eletromagnéticos, ocorre a chamada dispersão geométrica ou também espalhamento geométrico esférico, sendo que a energia de emissão sofre decréscimo de acordo com a distância entre a fonte emissora e o objeto em profundidade.

Outra consideração diz respeito à resolução horizontal de imageamento, relacionada com o espaçamento entre os traços. Reynolds (1997) destaca que a resolução horizontal é maior em imageamentos sobre meios constituídos por materiais com maior índice de atenuação, sendo inversamente proporcional à $\sqrt{\alpha}$. E quando há redução da resolução horizontal, ocorre um aumento do empilhamento de dados, continua o autor, sendo que os sistemas de radar aplicam o empilhamento para fins de elevar a intensidade do sinal de retorno em detrimento da resolução horizontal.

A Figura 11 ilustra a relação entre a largura da pegada de imageamento e a resolução horizontal, onde a representação à esquerda indica a aplicação de um feixe eletromagnético estreito, com menor empilhamento de dados e consequente otimização da resolução horizontal. De maneira contrária, a representação à direita indica que o alargamento do feixe eletromagnético implica na redução da resolução horizontal, porém com elevação do empilhamento de dados.

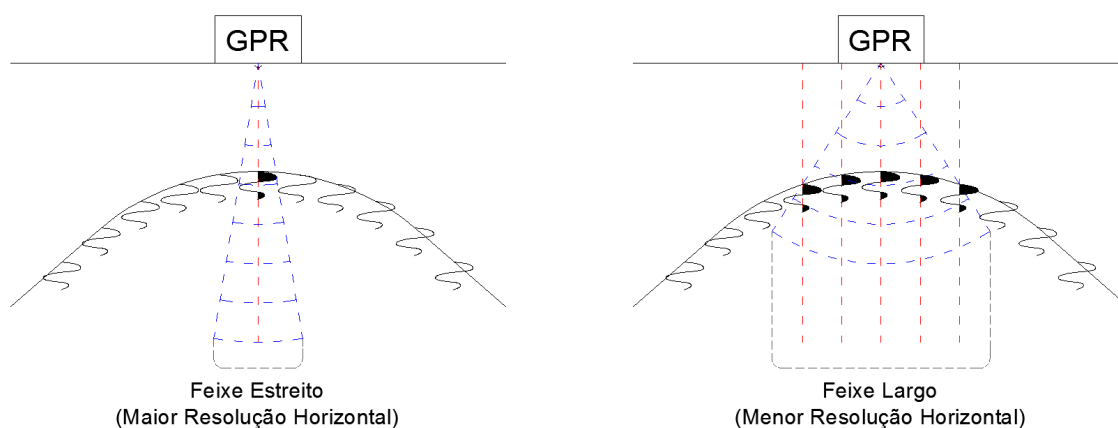


Figura 11 – Relação entre a pegada de imageamento e a resolução horizontal. Os traços de radar hachurados representam o empilhamento de dados (adaptado de Reynolds, 1997).

3.1.3. Propriedades Físico-Químicas do Solo e a Condutividade Elétrica

Compreendendo as relações entre as propriedades físicas que influenciam nas condições de propagação das ondas eletromagnéticas, sobretudo no que diz respeito à condutividade elétrica dos materiais, é preciso reconhecer as componentes do solo que interferem no sinal.

McNeill (1980) destaca a porosidade, o teor de umidade e a textura do solo como as principais propriedades físicas do solo que determinam a condutividade elétrica. Outros fatores ligados aos solos relacionados à condutividade elétrica são descritos por Rhoades *et al.* (1999) tais como o teor de matéria orgânica, o teor de salinidade e a temperatura do solo.

3.1.3.1. Porosidade e Teor de Umidade

Os solos têm em sua constituição quatro elementos (Figura 12) em inter-relação, partículas minerais, água, ar e materiais orgânicos (LEPSCH, 2002), sendo que a condutividade elétrica é intrinsecamente ligada à quantidade de água e suas características químicas (soluções) (McNEILL, 1980). Essa quantidade de água preenche os espaços vazios do solo, a porosidade, entendendo que a água em seu estado puro é um pobre condutor elétrico se comparada com a água apresentando alto teor de materiais em suspensão.

Porém, de acordo com Doolittle *et al.* (2007), o solo mesmo em condições de umidade em que o caracterizem como bem drenado pode influenciar a condutividade elétrica devido à retenção de água por capilaridade.

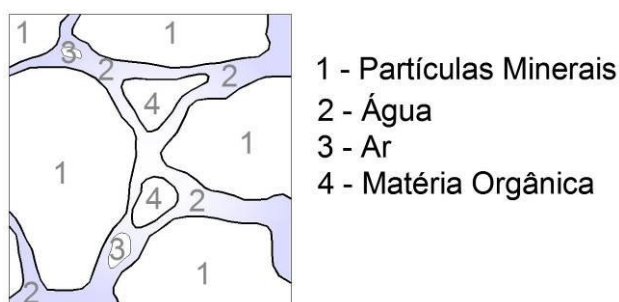


Figura 12 – Constituição do solo em quatro elementos (adaptado de Howe, 2000).

Entende-se que a porosidade dos solos representa uma condição física diretamente relacionada à textura dos solos, isto é, a composição dos solos, no que diz respeito às frações texturais arenosa e argilosa, define a constituição de espaços vazios como a macroporosidade e a microporosidade. Logo, outra condição é expressa por Thomas *et al.* (2007), explicando que o comportamento de propagação das ondas eletromagnéticas no solo é distinto devido às diferenças de condutividade elétrica entre volumes de água confinada e livre.

Entende-se como água confinada aquela retida por partículas minerais, no caso as argilas, referindo-se à microporosidade, e como água livre aquela para a qual é permitido o trânsito pelos macroporos, os quais predominam em solos de textura arenosa, definindo constantes dielétricas conforme o Quadro 3.

Elementos do Solo	Constante Dielétrica
Partículas Minerais	4,5 a 7
Ar	1
Água eletricamente ligada	3,5 a 3,8
Água Livre	81

Quadro 3 – Constantes dielétricas dos elementos constituintes dos solos (adaptado de Thomas *et al.*, 2007).

3.1.3.2. Textura e Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

Sabe-se que a capacidade de adsorção de água pela argila, bem como a concentração de cátions trocáveis, promove uma atenuação do sinal do Georradar devido à grande condutividade elétrica. Assim, a variação dessa condutividade no subsolo é função da capacidade de troca catiônica (CTC) associada às diferentes composições da argila.

Saarenketo (1998) aponta que essa condição é devida à variabilidade nas proporções de minerais de argilas, como o caulim, a mica, clorita, vermiculita e esmectita, as quais influenciam nas dimensões superficiais das partículas de argila,

na CTC, e na capacidade de retenção de água. Portanto, a condutividade elétrica é diretamente proporcional à CTC e a profundidade de penetração inversamente proporcional à quantidade de argila.

Segundo Vieira (1975), as argilas compõem a fração fina do solo (diâmetros inferiores a 0,002 mm) e são constituídas por silicatos hidratados de alumínio, ferro ou magnésio. São composições coloidais, ou seja, são constituídas por agregados de moléculas (entre 0,1 e 0,001 μm de diâmetro) que permitem a fixação de sais e íons (LEPSCH, 2011; VIEIRA, 1975).

A CTC é dada como a capacidade de um solo em reter os cátions trocáveis (cargas negativas) e isso é possível devido à composição coloidal das argilas (WUTKE & CAMARGO, 1972) e essa capacidade de retenção de cargas pelos colóides é função de determinado volume de solo (LEPSCH, 2002), de tal sorte que quanto maior é a quantidade de cargas retidas pelos colóides, maior deve ser a CTC.

O valor de CTC (T) é adotado pela EMBRAPA Solos para subdividir as classes de solos de acordo com a medida de atividade da argila (EMBRAPA, 1981; EMBRAPA, 2013) e pode ser definido pela equação 14.

$$CTC = T \times \left(\frac{1000}{g \cdot kg^{-1}} \right) \quad (14)$$

Onde o valor de CTC é calculado conforme método da EMBRAPA Solos.

De maneira que:

- a) Argila de Atividade Alta (Ta): $CTC \geq 27^*$ cmol_c/kg de argila ou $\geq 24^{**}$ cmol_c/kg de argila (argilominerais 2:1, solos pouco intemperizados);
- b) Argila de Atividade Baixa (Tb): $CTC < 27^*$ cmol_c/kg de argila ou menor que 24^{**} cmol_c/kg de argila (argilominerais 1:1 e hidróxidos de ferro e alumínio, solos bastante intemperizados).

* sem correção para carbono; ** com correção para carbono.

Alguns minerais de argila e seus respectivos valores para CTC (cmol_c/kg) são apresentados no Quadro 4.

Argilomineral	Retículo	CTC	Atividade Coloidal
Caolinita	1:1	1 - 10	Baixa
Ilita	2:1	10 - 15	Baixa
Mica	2:1	20 - 40	Alta
Montmorilonita	2:1	80 - 120	Extremamente Alta
Vermiculita	2:1	100 - 120	Alta
Clorita	2:1:1	20 - 40	Média
Alofana	Amorfa	10 - 150	Média
Matéria Orgânica	Amorfa	200 - 300	Alta

Quadro 4 – Tipos de argilominerais (adaptado de Wutke & Camargo, 1972).

A textura do solo é a proporção relativa das frações ou grupos de grãos que compõe o solo no que diz respeito à predominância de areia, silte e argila (VIEIRA, 1975), e permite o reconhecimento do nível de intemperização do solo e mobilidade da argila entre os horizontes do solo (IBGE, 2007). Em solos que a textura é arenosa, a CTC é associada à quantidade de matéria orgânica presente em seus volumes.

Os grupamentos texturais de solos considerados pela EMBRAPA (2013) em função das frações de argila são apresentados pelo Quadro 5 e representados pelo triângulo textural da Figura 13.

Textura	Composição
Arenosa	< 15% de argila
Média	> 15% de areia e < 35% de argila
Argilosa	entre 35 e 60% de argila
Muito Argilosa	> 60% de argila
Siltosa	< 35% de argila e < 15% de areia

Quadro 5 – Grupamentos texturais de solos (baseado em EMBRAPA, 2013).

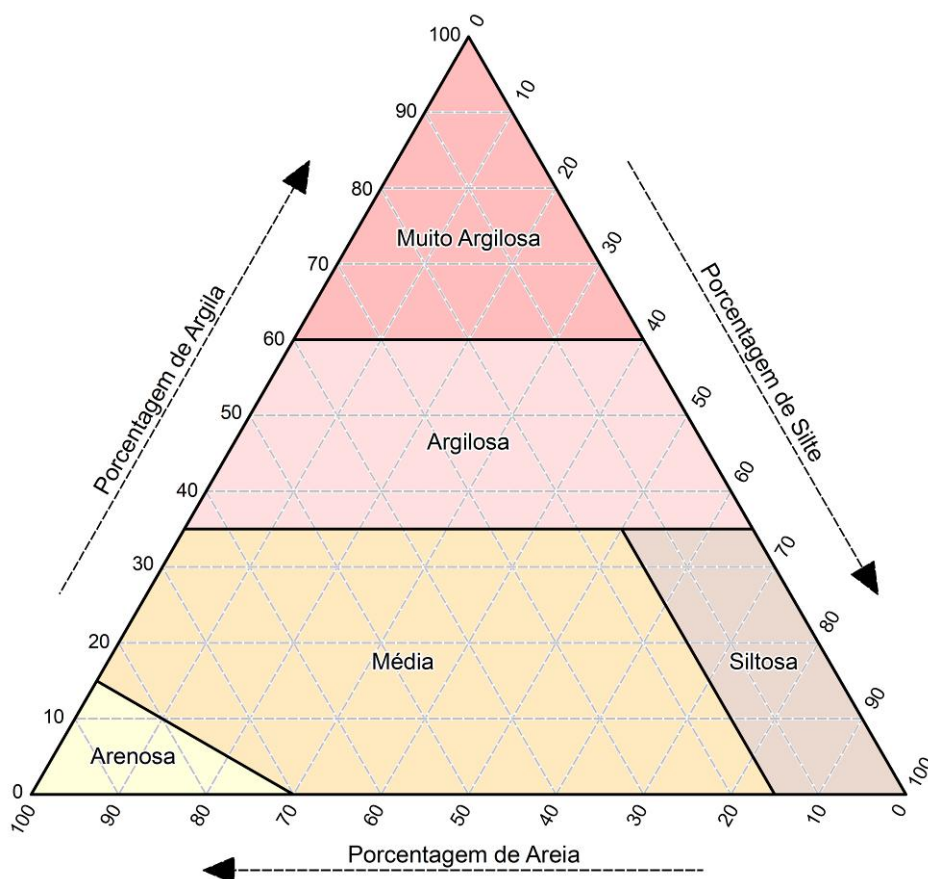


Figura 13 - Diagrama triangular para agrupamentos texturais de solos (adaptado de EMBRAPA, 2013).

Uma relação que deve ser respeitada, então, diz respeito à textura do solo e a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas, sendo que em solos com textura arenosa, apresentando teores de argila abaixo de 15%, tem-se o melhor deslocamento do sinal e menor dispersão de energia, ao passo que em solos com texturas médias a argilosas, contendo teores de argila superiores a 15 e 35%, tem-se como implicação a atenuação do sinal.

Considerando o exposto acima, Oliveira Junior (2001) destaca a ineficiência do Georradar em mapeamentos geológicos em regiões tropicais devido à presença de argila que atenua o sinal devido à sua alta capacidade de condução elétrica.

No entanto, em mapeamentos de solos, que exigem antenas de alta resolução e profundidade de penetração entre 2,5 e 3,5 m, portanto uma profundidade relativamente rasa de prospecção, as variações nas velocidades do sinal respeitando as propriedades físicas dos solos e seus teores de argila podem beneficiar a interpretação e leitura dos radargramas obtidos pelo Georradar.

Em resumo, a dificuldade ou ausência de resposta obtida pelo Georradar pode ser considerada como informação a ser interpretada conforme o conhecimento prévio do pesquisador sobre as propriedades físicas do solo local.

3.1.3.3. Salinidade

Outro fator importante a ser observado quando se utiliza o Georradar para mapeamentos pedológicos é o caráter salino de alguns tipos de solos, os quais apresentam alta condutividade elétrica e interferem significativamente no imageamento, devido à atenuação do sinal e redução em profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas (DOLLITTLE & COLLINS, 1995, *apud* DOOLITTLE & BUTNOR, 2009).

Entende-se por salinidade do solo a presença de soluções salinas principalmente em condições úmidas do solo, o que contribui para a condução elétrica em uma relação direta, a qual é associada às características dos minerais de argila (CTC) (RHOADES *et al.*, 1999).

O processo de salinização do solo é explicado por Vieira (1975) e reflete uma condição específica do local, sobretudo aquele em que incide um clima de aridez, ou também em solos sob influência fluviomarinha. Os sais mais comuns são os sulfatos, carbonatos e cloretos de sódio, cálcio, magnésio e fósforo.

Os solos que podem apresentar alto teor de salinidade são definidos como solos halomórficos em conjunto com aqueles que apresentam alto teor de sódio.

A EMBRAPA (2013) através de seu Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos reconhece a incidência de sais nos solos a partir da identificação dos caracteres salino, sálico, sódico e solódico, sendo a relação de condutividade elétrica em função da presença de sais solúveis nos solos dado como se segue: i) caráter salino quando o solo apresenta condutividade elétrica maior ou igual a 4 dS/m e menor que 7 dS/m (a 25°C); ii) caráter sálico quando o solo apresenta condutividade elétrica maior ou igual a 7 dS/m (a 25°C).

3.1.3.4. Matéria Orgânica e Temperatura

A matéria orgânica, assim como as argilas, se apresentam como estruturas coloidais, porém neste caso é amorfa, e possui também a capacidade de troca catiônica (CTC entre 200 e 300 cmol_c/kg) sendo diretamente proporcional ao pH do solo (JORGE, 1972).

A temperatura dos solos está associada ao teor de umidade e pode descrever uma função linear positiva como indica Coelho *et al.* (2005), cujo estudo desenvolvido encontrou resultados acerca da condutividade elétrica dos solos em função da temperatura e umidade uma relação diretamente proporcional, ao ponto em que a condutividade elétrica a partir da leitura da temperatura é maior à medida que se tem acréscimo de umidade.

Todavia, dentre os fatores descritos anteriormente, o teor de matéria orgânica e a temperatura dos solos são os que implicam menor condutividade elétrica ao meio, ainda que, segundo Rhoades *et al.* (1999), para cada grau Celsius em acréscimo de temperatura tem-se um aumento de até 2% da condutividade elétrica em solos com significativo teor de umidade.

4. APLICAÇÃO DO GEORRADAR EM ESTUDOS PEDOLÓGICOS

Com base no arcabouço técnico e teórico apresentado nos capítulos anteriores, é possível compreender o funcionamento do Georradar aplicado para o mapeamento pedológico de detalhe, enquanto ferramenta para auxiliar na identificação de solos em prospecções indiretas.

A prospecção eletromagnética de solos consiste na aplicação do Georradar para o reconhecimento da geometria dos volumes pedológicos a partir da interpretação dos radargramas fornecidos pelo equipamento, e com base no conhecimento prévio das características dos solos em estudo.

Como já foi mencionado no início deste trabalho, o Georradar é uma ferramenta que compõe um método não destrutivo, e tem como técnica a aquisição de dados contínuos que permite a visualização em profundidade das camadas do solo (SUCRE *et al.*, 2011).

Os mesmos autores indicam a possibilidade do reconhecimento da geometria dos volumes pedológicos com maior precisão em solos que permitem a aplicação do Georradar ou com potencialidade para a sua aplicação, também contribuindo para a quantificação de nutrientes de determinados solos.

Com relação à potencialidade de aplicação do Georradar em mapeamentos pedológicos, Doolittle *et al.* (2007) a determinam para os solos dos Estados Unidos definindo índices de adequação relativa para unidades do mapa de solos do país a partir da correlação entre as propriedades físico químicas dos solos e suas relações de condutividade elétrica, como demonstra o Quadro 6, utilizando-se de antenas com frequências centrais de 100 e 200 MHz.

Os autores explicam que o objetivo desse estudo é apresentar um mapa⁹ de adequação à aplicação do Georradar nos solos do país como ferramenta preliminar de avaliação de métodos a serem empregados nos mapeamentos pedológicos. Porém em escala regional, não excluindo a possibilidade de uso do equipamento em nenhuma das áreas demarcadas, mesmo por que o funcionamento do equipamento depende das particularidades locais quando o foco do estudo é o levantamento de detalhe.

⁹ O Mapa de Adequação à Aplicação do GPR nos solos dos Estados Unidos, bem como a metodologia aplicada em detalhes, pode ser acessado em: <http://soils.usda.gov/survey/geography/maps/GPR/>.

Índice de Adequação Relativa	Potencialidade	Tipos de Solos (Teores de Argila)	Profundidade de Imageamento (200 MHz)
≤ 1	Muito Alta	Solos que apresentam teores de argila inferiores a 10% ou solos orgânicos muito profundos	1,0 a 15,0 m
> 1 e ≤ 2	Alta	Solos que apresentam teores de argila entre 10 e a 18% ou solos orgânicos muito profundos	1,0 a 15,0 m
> 2 e ≤ 3	Moderada	Solos minerais contendo teores de argila entre 18 e 35%, ou que tenham entre 35 e 60% de argila com baixa atividade	0,5 a 5,0 m
> 3 e ≤ 4	Baixa	Solos minerais contendo teores de argila superiores a 35%, ou solos calcários teores de argila entre 18 e 35%	0,25 a 2,0 m
> 4 e ≤ 5	Muito Baixa	Solos minerais contendo teores de argila superiores a 60%	0,25 a 2,0 m
> 5	Inadequado	Solos salinos e sódicos	-

Quadro 6 – Potencialidade da aplicação do Georradar em função dos tipos de solos (adaptado de Doolittle *et al.*, 2007).

No entanto, é difícil e não muito adequado especificar uma antena conforme o tipo de solo local, justamente por ser necessário levar em consideração a disponibilidade do equipamento e a possibilidade de aquisição de antenas que operam em diferentes frequências. Também devem ser consideradas as propriedades dos materiais que constituem o corpo pedológico alvo, os parâmetros de funcionamento do equipamento disponível para adequar a profundidade e resolução de imageamento desejadas, conforme o escopo do trabalho, assim como a sazonalidade climática, a qual influencia no teor de umidade local.

Doolittle *et al.* (2009) ressaltam a aplicação do Georradar para a determinação das profundidades dos horizontes diagnósticos subsuperficiais, sobretudo aqueles que representam condições especiais como cimentação por incremento de argila e matéria orgânica por iluviação. Os autores confirmam também que o equipamento não é capaz de distinguir mudanças sutis nas camadas do solo em relação a horizontes de transição, ou mesmo outras propriedades dos solos como a cor, manchas de alteração, porosidade e estrutura.

Dentre as faixas de frequência em que operam as antenas de Georradar disponíveis no mercado, Doolittle *et al.* (2009) relacionam aquelas que melhor se aplicam aos diferentes tipos de solos de acordo com a profundidade máxima de penetração do sinal em subsuperfície e as condições atenuantes desses solos em questão, como resume o Quadro 7.

Frequência	Profundidade	Tipos de Solos
1,5 GHz	0 a 0,75 m	Solos Arenosos
900 MHz	0 a 1,0 m	Solos Arenosos
500 MHz	0 a 4,0 m	Solos Minerais Secos
200 MHz	0 a 9,0 m	Solos Orgânicos
70 MHz	0 a 50 m	Solos Orgânicos

Quadro 7 – Tipos de solos e profundidade máxima de imageamento em função da frequência da antena empregada (adaptado de Doolittle *et al.*, 2009).

Em estudo desenvolvido por Sucre *et al.* (2011) com a aplicação do Georradar sobre solos no Sul das montanhas Apalaches, na América do Norte, foram estimadas as profundidades dos solos aplicando antenas de 200 e 400 MHz em comparação com métodos convencionais de prospecções, utilizando-se de trados manuais. Verificaram a subestimação de horizontes diagnósticos de subsuperfície B quando da elaboração de perfis a partir de dados obtidos por tradagens, resultado que na prática pode vir a reduzir as estimativas de nutrientes e capacidade de retenção de água dos solos.

Os autores concluem também que o tipo de mineral de argila associado ao grau de intemperismo dos solos são fatores condicionantes para a profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas, mas também que a técnica pode reduzir o custo financeiro e de tempo do trabalho em campo, assim como os resultados se mostraram mais precisos em comparação com aqueles obtidos pela técnica convencional.

Contudo, é importante destacar, que a estimativa correta das espessuras dos horizontes pedológicos necessitam de dados que legitimem os registros em radargramas (LAPEN *et al.*, 1996), tais como aqueles obtidos através de práticas convencionais de observação e caracterização de solos em campo, referindo-se a aplicação de trados manuais, descrição de perfis em cortes no terreno, ou mesmo trincheiras.

Nesse sentido, conforme a proposta do presente estudo, a caracterização do equipamento utilizado e a definição de seus parâmetros de funcionamento são explicitadas nos procedimentos técnicos adotados para a prospecção eletromagnética dos solos escolhidos.

4.1. PROCEDIMENTOS TÉCNICOS E METODOLÓGICOS

Para atingir os objetivos propostos neste estudo, respeitou-se a seguinte estrutura de trabalho ilustrada pela Figura 14.

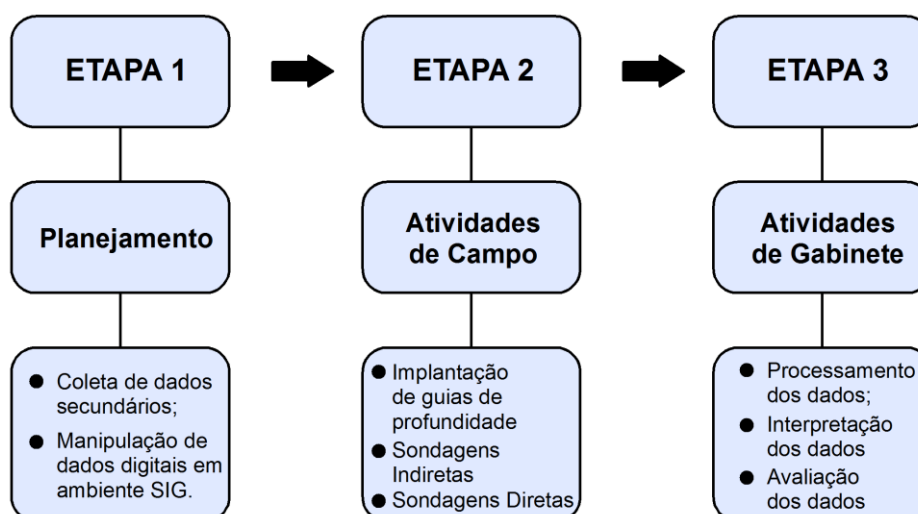


Figura 14 – Estrutura de Trabalho Adotada.

A etapa inicial do trabalho envolveu a definição de locação dos perfis para uso da sondagem indireta (aplicação do Georradar propriamente dita), baseando-se em mapeamentos prévios de solos dos locais escolhidos para o seu emprego, utilizando-se para tanto de ferramentas em ambiente SIG (Sistemas de Informação Geográfica), tais como os *softwares* AutoCAD Map 2010™ e Arc GIS 9.3™, para a manipulação de dados digitais e georreferenciados.

A escolha dos solos imageados levou em consideração a existência de dados secundários sobre os mesmos, assim como a possibilidade de observação dos limites entre os horizontes pedológicos a partir de trincheiras ou cortes no terreno previamente implantados.

O Quadro 8 permite a visualização das diferentes classes de solos imageados e seus respectivos locais de origem no território paranaense.

Ordem	Localização	Litologia	Unidade Geomorfológica
Espodossolos	Paranaguá	Coberturas sedimentares marinhas e deltaicas do Cenozóico	Planície Litorânea
Cambissolos	Pinhais	Sedimentos inconsolidados da Formação Guabirotuba	Primeiro Planalto
Argissolos	Maringá	Derrames basálticos do Mesozóico	Terceiro Planalto

Quadro 8 – Tipos de solos e caracterização de seus locais de origem.

Posteriormente, compondo a segunda etapa de trabalho, o estudo prosseguiu com as atividades de campo, referindo-se à prática da limpeza e locação dos traçados para as sondagens indiretas e com a execução de sondagens diretas auxiliares através de trado manual para a coleta de dados a fim de compreender a existência de refletores anômalos ao longo do traçado do perfil.

Para essa etapa, a implantação de guias de profundidade em trincheiras ou cortes possibilitou a melhor calibração dos parâmetros adotados para o uso do instrumento, assim como na etapa seguinte auxiliou no processo de tratamento dos dados.

A etapa final refere-se aos trabalhos de gabinete, com a execução de procedimentos de pós-processamento dos dados adquiridos pelo equipamento, interpretação dos radargramas com a construção dos perfis pedológicos e/ou pedossequências, e análise e avaliação dos resultados obtidos para os tipos de solos em estudo com o reconhecimento de suas propriedades em função das respostas eletromagnéticas.

O trabalho de pós-processamento dos dados obtidos pelo Georradar foi executado utilizando-se o *software* RADAN 6.6™, cuja licença foi obtida em conjunto com o equipamento Georradar. Trata-se de uma ferramenta específica para o tratamento dos radargramas com a aplicação de filtros de redução de ruídos de altas e baixas frequências, a compensação exponencial para as respostas do sinal e a correção topográfica.

Com base nos resultados obtidos, foram avaliadas as potencialidades e limitações da aplicação do Georradar neste estudo de prospecção eletromagnética de solos, constituindo a etapa final da pesquisa.

4.1.1. Método de Prospecção Eletromagnética em Perfil Pedológico

Para a prospecção eletromagnética de solos foi utilizado o Georradar modelo SIR-3000 (Figura 15) de propriedade do Laboratório de Biogeografia e Solos (LABS) do departamento de Geografia da UFPR, produzido pela *Geophysical Survey Systems Inc.* (GSSI), em modelo móvel (Figura 16a) com funcionamento pelo método do espaçamento fixo entre as antenas emissora e receptora (*common offset*).

Adotou-se o conjunto de antenas que possui frequência central de 270 MHz (Figura 16b), isto é, opera na faixa entre as frequências de 135 e 405 MHz, com alcance aproximado de profundidade em até 6 m de acordo com as características ou propriedades dos materiais que constituem o solo, sendo, portanto, própria para prospecções rasas e de altas resoluções aplicadas a estudos geológicos, arqueológicos e pedológicos.



Figura 15 – Unidade de Controle do Georradar (Modelo SIR-3000).

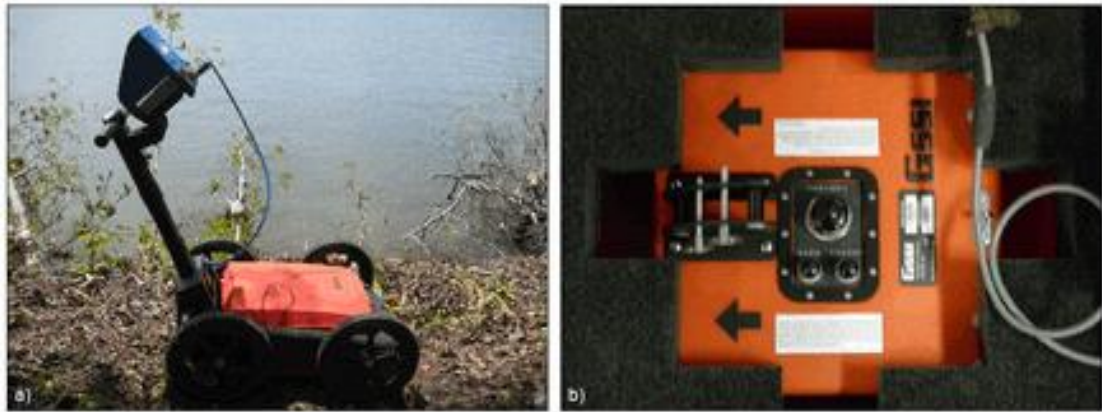


Figura 16 – a) Georadar em modelo móvel. b) Conjunto de antenas emissora e receptora com frequência central de 270 MHz.

A limpeza dos traçados se fez necessária para retirada de algumas irregularidades superficiais que poderiam interferir no caminhamento do Georadar, como galhos, troncos e vegetação rasteira, sendo que o trabalho foi efetuado utilizando ferramentas simples como enxadadas e pás.

Para auxiliar na posterior interpretação dos radargramas produzidos pelo Georadar foram então implantadas as hastes metálicas (Figura 17) entre os contatos dos horizontes pedológicos quando o transecto se fazia beirando cortes ou trincheiras no solo.

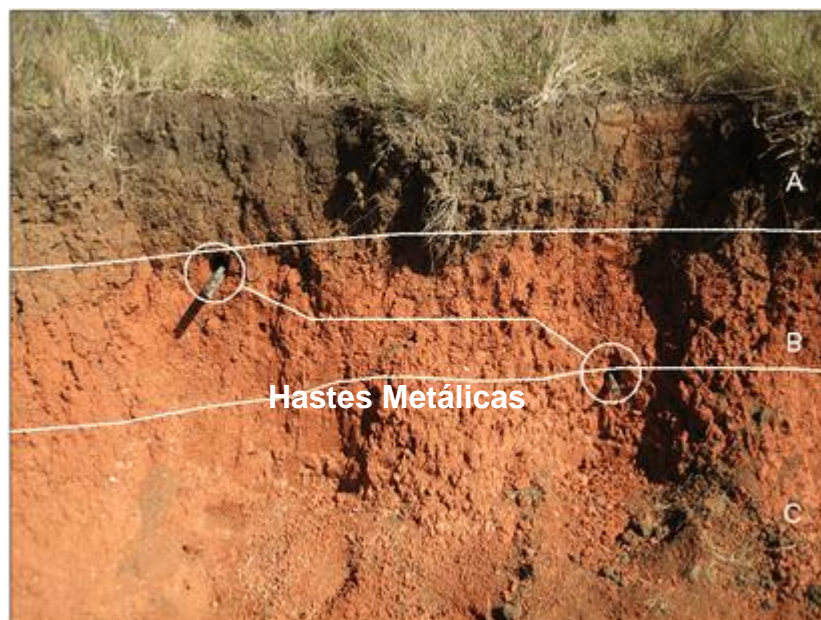


Figura 17 – Implantação das hastes metálicas no perfil pedológico.

Perfurações horizontais foram efetuadas com trado manual para fins de implantação de guias de controle para determinação de profundidades dos horizontes, assim como sondagens diretas auxiliares foram destinadas para a coleta de amostras de solos, a fim de compreender sinais anômalos ou pontos notáveis do radargrama.

A caracterização morfológica dos perfis de solos em trincheiras tem como base o método apresentado por Santos *et al.* (2005) em seu Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo. Os perfis e sondagens executados foram descritos a partir de análise táctil-visual, observando-se características dos horizontes tais como espessuras dos volumes pedológicos, as texturas dos mesmos e as cores segundo o sistema de classificação de Munsell (2000).

4.1.1.1. Configurações do Georradar

Antes da utilização do Georradar, fez-se necessária a calibração do odômetro da unidade de controle para a tomada de dados conforme a distância percorrida pelo equipamento. É importante salientar, que o odômetro é conectado apenas às rodas traseiras do módulo móvel, exigindo que as mesmas sejam mantidas constantemente em contato com a superfície do terreno para a correta demarcação da extensão em comprimento do radargrama.

A unidade de controle apresenta em seu sistema operacional quatro *softwares* embutidos, dos quais três contêm parâmetros de aquisição de dados pré-definidos e fixos, específicos para a faixa de frequência de determinada antena e o objetivo de investigação, tais como geologia e estruturas de concreto (altas frequências). O quarto *software* é aberto e livre para a definição de parâmetros que atendam o objetivo da prospecção, sendo adotado para o mapeamento eletromagnético dos solos nesse caso.

Os parâmetros foram definidos de acordo com a resposta recebida e com base nas propriedades dos solos imageados. A unidade de controle do Georradar produz um gráfico instantâneo a partir da leitura da subsuperfície local, o que permite definir a profundidade e resolução de imageamento conforme a determinação dos parâmetros adequadamente, a saber:

a) **Número de amostras por traço (*samp/scan*):** trata-se do número de amostras que compõem um traço de radargrama, sendo que quanto maior o valor (máximo 1024) maior será a resolução do imageamento, entendendo que a correta seleção do número de amostras por traço influenciará, portanto, na qualidade dos dados adquiridos, de maneira a evitar a sobreposição de amostras.

Para o trabalho aqui proposto adotou-se o valor máximo de 1024 amostras por traço em favor da resolução do imageamento, lembrando que o valor é também sugerido pela empresa que produz o Georradar utilizado (GSSI) para a maioria das aplicações.

Aplicações em prospecções mais profundas exigem um incremento no número de amostras e se faz para compensar a resolução de antenas com menor frequência de operação.

b) **Frequência de Amostragem (*fa*):** a frequência de amostragem pode ser definida a partir da equação 15:

$$fa = \frac{1}{2\Delta t} \quad (15)$$

Onde: fa é a frequência de amostragem e $2\Delta t$ é o intervalo de tempo duplo de viagem do pulso eletromagnético.

No entanto, Howe (2000) indica que a amostragem ideal é definida conforme a frequência de Nyquist, a qual descreve uma frequência máxima sob o valor igual a um período e meio da frequência central, conforme as equações 16 e 17.

$$fc = \frac{1}{\Delta t} \quad \therefore \Delta t = \frac{1}{fc} \quad (16)$$

$$\Delta t = \frac{tmáx}{2} \quad \therefore tmáx = \frac{1}{fmáx} \quad \therefore fmáx = 1,5fc \quad (17)$$

Onde: Δt é o intervalo de tempo de viagem do pulso eletromagnético, $tmáx$ é a soma dos tempos de emissão e recepção do pulso eletromagnético, fc é a

frequência central de operação da antena; e $f_{máx}$ é a frequência máxima dentro da faixa de operação da antena.

Para o caso do georradar o valor da amostragem seria de até 6 vezes a frequência central da antena utilizada, como descrevem as equações 18 e 19:

$$\Delta t = \frac{1}{3fc} \quad (18)$$

$$fN = 6fc \quad (19)$$

Onde: fN é a frequência de amostragem de Nyquist.

Considerando a frequência central da antena adotada para o estudo ($fc = 270\text{Mhz}$), tem-se a seguinte frequência de amostragem (equação 20):

$$fN = 6 \times 270 \therefore fN = 1620\text{Mhz} \quad (20)$$

c) **Alcance (Range)**: refere-se à janela de tempo (*Time Window – TW*), dada em nanossegundos (ns), em que o equipamento registra o sinal de retorno e indica a profundidade máxima de imageamento, sendo esse valor definido no local de imageamento conforme as propriedades do solo a ser mapeado e da profundidade que se deseja atingir, considerando também a frequência de operação da antena utilizada, definida segundo a equação 21.

$$TW = \frac{na}{fa} \quad (21)$$

Onde: na é o número de amostras e fa é a frequência de amostragem.

A janela de tempo também pode ser definida através da equação 22:

$$\sigma = \frac{2\Delta x}{t} \therefore t = \frac{2\Delta x}{\sigma} \quad (22)$$

Onde: σ é a velocidade de propagação da onda eletromagnética em função do meio, Δx é a distância entre elemento ou interface de interesse e a superfície de imageamento (no caso a distância a ser considerada é a profundidade de

imageamento desejada) e t é o tempo de propagação da onda eletromagnética em subsuperfície e, portanto, a janela de tempo necessária para que determinada velocidade de propagação permita a penetração do pulso na profundidade desejada.

Em geral, as janelas de tempo para as prospecções deste estudo foram determinadas a fim de atender um imageamento com capacidade de penetração de até 3 m em profundidade. Assim, considerando a profundidade de penetração, definiram-se as janelas de tempo *in situ*, para o imageamento dos solos selecionados, conforme relação do Quadro 9.

Classe de Solos	Profundidade de Imageamento (m)	Alcance – TW ou t (nS)
Espodossolos	3,0	60
Cambissolos	2,0	80
Argissolos	2,5	70

Quadro 9 – Janelas de tempo definidas em função da profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas para o imageamento dos solos selecionados.

d) **Empilhamento (*Stacking*):** refere-se ao número de vezes em que o sinal é emitido e recebido para um único traço sendo o registro para fins de remoção de ruídos aleatórios durante a aquisição dos dados. Também, quanto maior o número do empilhamento, menor deverá ser a velocidade de locomoção do Georradar sobre a linha do perfil desejado para possibilitar o maior número de “viagens” da onda para cada traço. O empilhamento, como visto anteriormente, é aplicado para fins de otimizar a intensidade do sinal de retorno, porém reduzindo a resolução horizontal do imageamento (REYNOLDS, 1997).

Para o estudo em questão, manteve-se o valor de empilhamento igual a 32, a exemplo da aplicação de Howe (2000), com a intenção de manter certa qualidade dos dados adquiridos, porém sem exigir a necessidade de maior tempo para a coleta dos mesmos. Este valor é automaticamente definido pelo equipamento da GSSI¹⁰.

¹⁰ Alguns técnicos de Georradar sugerem não utilizar o empilhamento para a aquisição de dados quando utilizados os equipamentos da GSSI, pois afirmam que ao considerar esse parâmetro obtém-se um resultado contrário à função preestabelecida, reduzindo a qualidade do sinal com a adição de ruídos de alta frequência.

e) **Constante Dielétrica:** trata-se da propriedade de maior importância para mapeamentos eletromagnéticos em solos, influenciando também na definição do parâmetro de alcance, haja vista a interferência nas condições de propagação da onda eletromagnética em subsuperfície e determinando a profundidade versus a resolução do imageamento.

No entanto, como mencionado em tópico específico acerca dos parâmetros de propagação das ondas eletromagnéticas em subsuperfície, os valores aplicados para os imageamentos em perfis referem-se às médias das permissividades dos materiais constituintes do solo e variam de acordo com as condições de umidade do meio. Por isso, torna-se importante o conhecimento prévio da classe textural do solo local e conseqüentemente de sua permissividade dielétrica média.

Em geral, o valor adotado para a aquisição de dados define a relação entre a janela de tempo (alcance) e a profundidade, estando relacionado diretamente à velocidade média de propagação da onda (GSSI, 2009).

Para o estudo proposto, o valor que melhor atendeu a relação resolução versus profundidade de imageamento em associação com os outros parâmetros de configuração supracitados é igual a 12, tanto para solos arenosos quanto para solos argilosos. Sendo assim, enquadra-se nos intervalos propostos por Cassidy (2009), de acordo com o Quadro 10, que utilizando uma antena com frequência central de 100 MHz definiu o intervalo de constante dielétrica de 10 a 20 para solos argilosos saturados e de 10 a 15 para solos muito argilosos saturados.

Tipos de Solos (Textura)	Velocidade Média (σ) (m/nS)	Constante Dielétrica (k)
Arenoso Seco	0,1 a 100	4 a 6
Arenoso Saturado	10 a 100	15 a 30
Argiloso Seco	0,1 a 1	4 a 6
Argiloso Saturado	10 a 100	10 a 20
Muito Argiloso Seco	0,1 a 100	4 a 6
Muito Argiloso Saturado	100 a 1000	10 a 15
Médio	5	16

Quadro 10 – Constantes dielétricas definidas para diferentes classes texturais de solos (Adaptado de Cassidy, 2009).

Posteriormente, durante o trabalho de pós-processamento dos dados, a constante dielétrica média correta para cada solo objeto de estudo foi devidamente calculada conforme o reconhecimento da velocidade média de propagação das ondas eletromagnéticas nos solos, obtida a partir das guias de controle.

De modo geral, após a configuração dos parâmetros desejados para cada solo objeto de estudo, apresentados em resumo pelo Quadro 11, é possível então verificar uma mudança nas assinaturas eletromagnéticas dos alvos em subsuperfície conforme os valores da constante dielétrica e alcances aplicados. Essa mudança é confirmada através da identificação das curvas de reflexão, ou hipérboles de reflexão, dos alvos implantados entre os contatos dos volumes pedológicos, conforme demonstração do radargrama não processado apresentado pela Figura 18. As hipérboles representadas em vermelho indicam a localização de implantação das hastes metálicas no solo entre os contatos dos horizontes A/B e B/C.

Classe de Solos	Constante Dielétrica (k)	Profundidade de Imageamento (m)	Alcance (nS)
Espodossolos	12	3,0	60
Cambissolos	12	2,0	80
Argissolos	12	2,5	70
Nº de Amostras por Traço			1024
Frequência de Amostragem (fN)			1620 MHz

Quadro 11 – Parâmetros adotados para o imageamento dos solos apresentados.

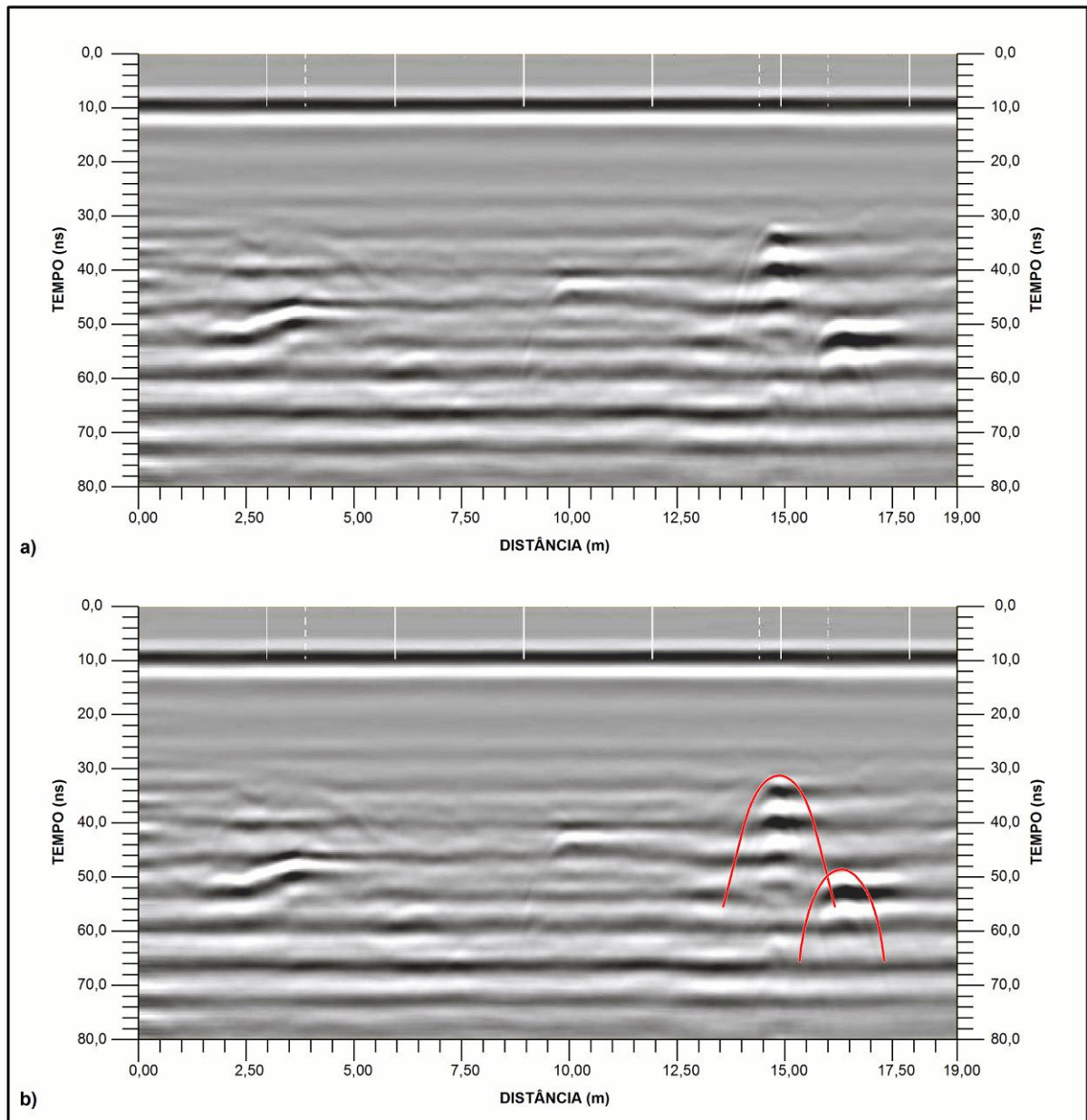


Figura 18 – a) Radargrama bruto; b) Reconhecimento das hastas metálicas a partir de hipérbolas de reflexão.

4.1.2. Processamento dos Dados de Imageamento

O trabalho de pós-processamento dos dados pôde ser subdividido em dois momentos, referindo-se aos processamentos básicos e processamentos avançados, conforme definido pela GSSI (2009). Os processamentos básicos definiram a correção da posição em relação ao tempo zero, permitiram a remoção do plano de fundo resultado de ruídos constantes ao longo do radargrama, e possibilitaram a execução da migração de velocidade constante, da deconvolução preditiva e da correção topográfica da superfície do perfil. Os processamentos avançados, por sua vez, trataram da aplicação de filtros e ajustes de ganhos para o alcance.

4.1.2.1. Processamentos Básicos

a) **Correção do tempo zero (*Time-Zero*):** A correção da posição em relação ao tempo zero (Figura 19) corresponde à remoção da faixa aérea, isto é, de dados adquiridos antes da onda direta, aquela referente à resposta de pulsos refletidos pela superfície.

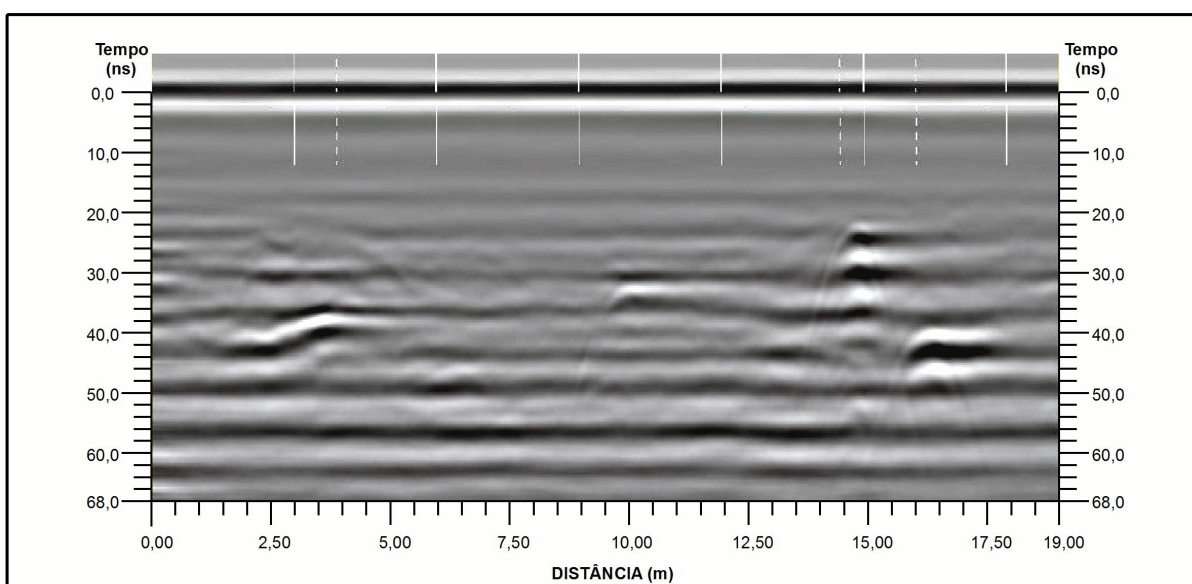


Figura 19 – Radargrama em processamento: correção do tempo zero.

b) **Remoção do plano de fundo (*Background Removal*):** Trata da aplicação de um filtro para remoção de ruídos de alta frequência horizontais, os quais são distribuídos de forma constante nos dados e resultantes de interferências locais. Esse filtro age de forma a suprimir os sinais lineares e constantes a fim de acentuar as respostas nas variações horizontais entre os dados de imageamento, como bem demonstra a Figura 20.

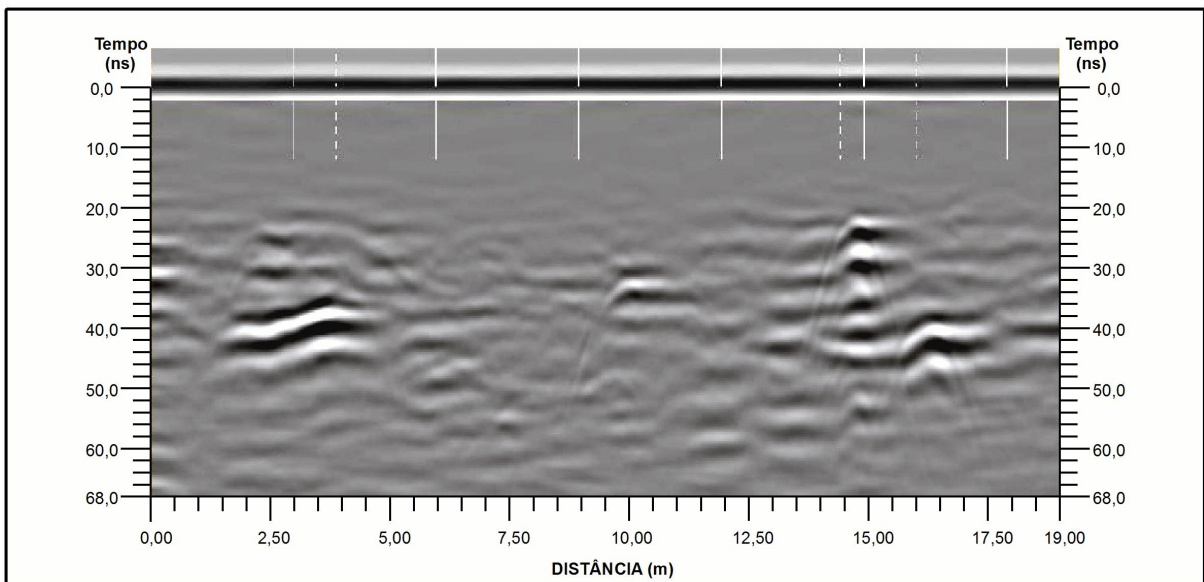


Figura 20 – Radargrama em processamento: remoção do plano de fundo.

c) **Deconvolução (*Deconvolution*):** A deconvolução preditiva trata-se de um filtro capaz de remover ruídos de reflexões múltiplas ou repetitivas que sobreponham os dados do radargrama degradando sua resolução. Esses ruídos são decorrentes principalmente em solos com alto teor de argila e também saturados.

O procedimento de deconvolução permite eliminar ruídos de baixa frequência horizontalizados em ocorrência com o aumento de profundidade de penetração do sinal e não em tempo de resposta. A Figura 21 ilustra a aplicação desse procedimento de processamento.

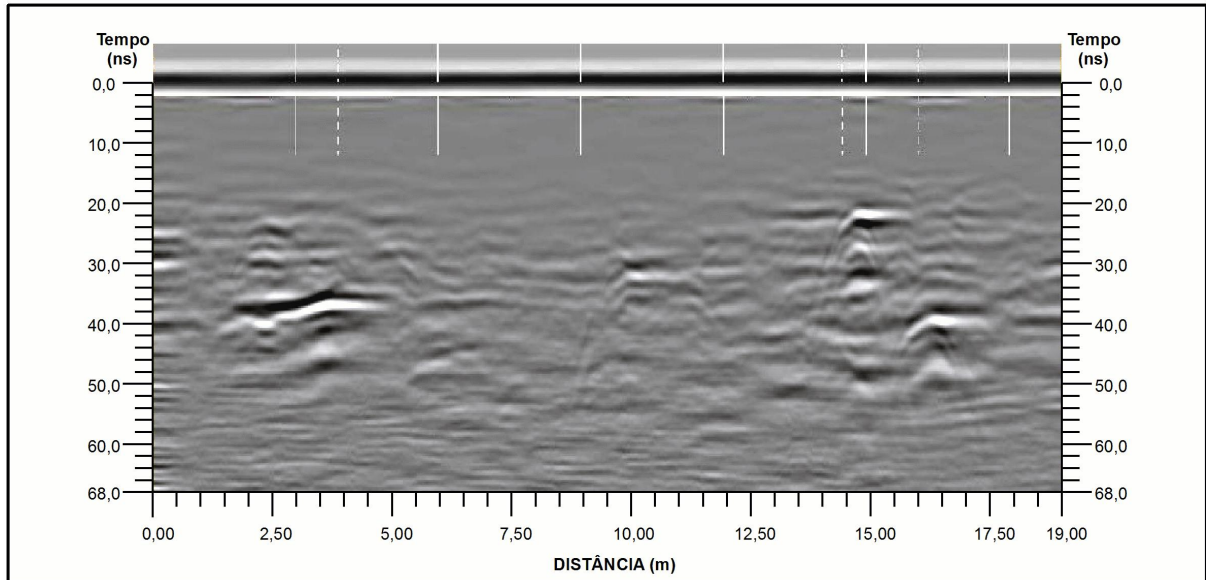


Figura 21 – Radargrama em processamento: aplicação do procedimento de deconvolução.

d) **Migração (*Migration*):** A migração de velocidade constante tem por finalidade a remoção das curvas ou hipérbolas de reflexão (Figura 22a), sendo, portanto, um filtro capaz de permitir a melhor visualização de alvos que se destacam no perfil, tal qual ocorre com as hastes metálicas (Figura 22b).

O procedimento de migração tem a função de colapsar os refratores e reposicionar os refletores em sua localização real em subsuperfície (ANNAN, 1999), permitindo corrigir sua profundidade. Adotou-se a migração pelo método de Kirchhoff, também conhecido como método de empilhamento de difração (*diffraction stack*), o qual tem como princípio a somatória das amplitudes que descrevem a hipérbole, transportando o resultado para o seu ápice (GAZDAG & SGUAZZERO, 1984).

Em adição, permite a definição da velocidade média de propagação das ondas eletromagnéticas no solo e, conseqüentemente, a determinação do valor da permissividade dielétrica, conforme a equação 23¹¹.

$$k = \left(\frac{C}{V} \right)^2 \quad (23)$$

Onde: V é dada em m/ns, $C \approx 3,0 \times 10^8$ m/s (0,3 m/ns) e k é a constante dielétrica do meio de propagação.

¹¹ Derivada de $V = C \div \sqrt{k}$ (Equação 10).

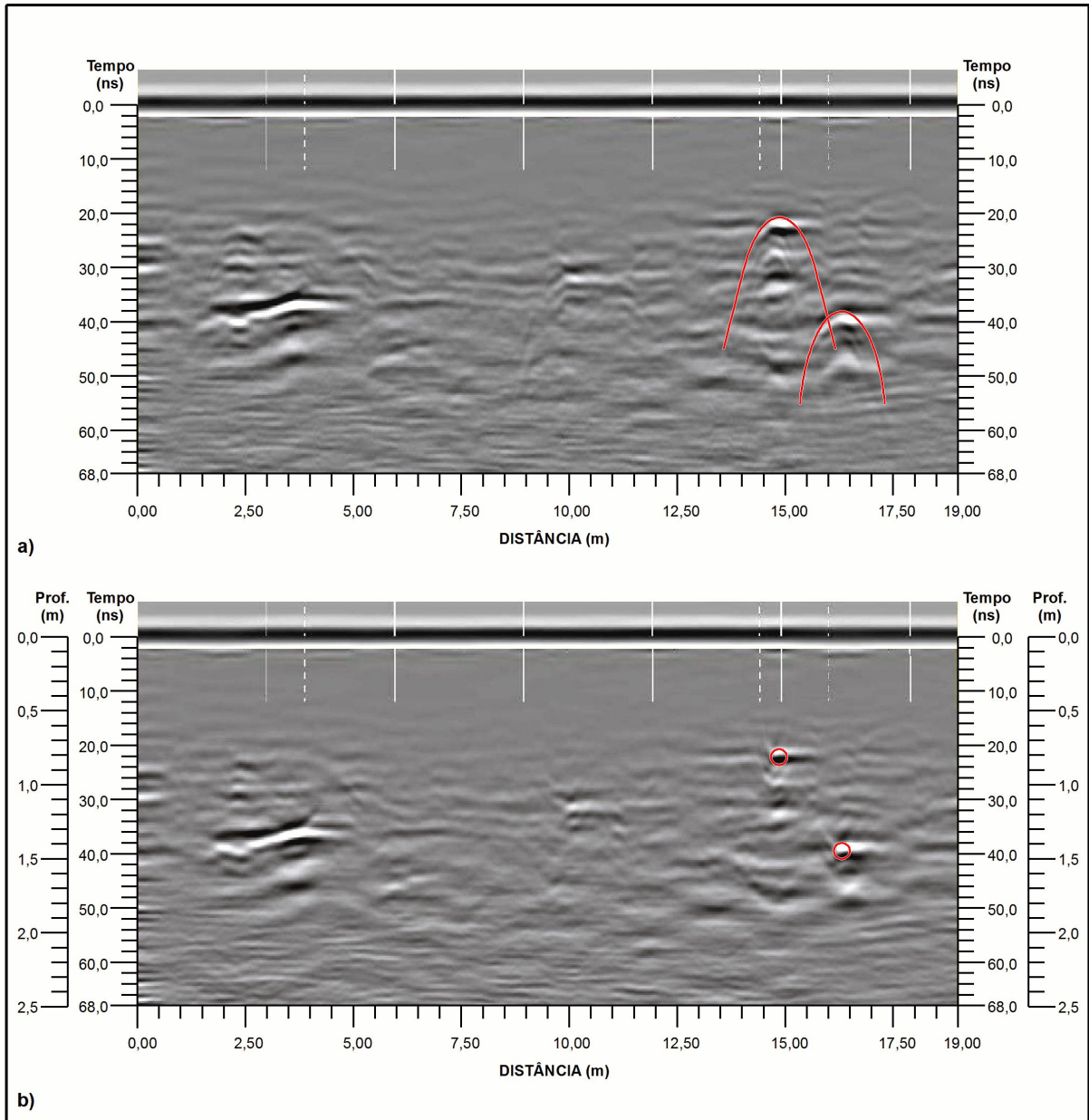


Figura 22 – a) Identificação das hipérboles de reflexão (em vermelho); b) Aplicação do procedimento de migração pelo método de Kirchhoff, identificando a localização das hastes metálicas (círculos vermelhos) inseridas no solo a partir do colapso das hipérboles de reflexão. Com base no procedimento de migração, é possível realizar a conversão do perfil de tempo para profundidade.

É importante destacar que o método de prospecção através do georradar tem sua precisão dependente da constante dielétrica, conforme discutido nos capítulos anteriores. Borges (2007) aponta que a conversão do perfil de tempo (ns) para profundidade (m) pode ser realizada através de um único valor de constante dielétrica conhecida, sobretudo quando em situações onde o meio tem características homogêneas.

Esta lógica pode ser aplicada durante o processamento de dados de solos que apresentam características físicas constantes em profundidade, isto é, quando há relativa homogeneidade das características texturais (frações de areia e argila) dos volumes pedológicos imageados. Todavia, torna-se importante a análise com maior cuidado quando os meios apresentam diferentes situações, em especial quando há variação do teor de argila tanto em profundidade quanto longitudinalmente.

e) **Correção topográfica (*Surface Normalization*):** Esse procedimento visa à conformação da superfície do perfil a partir de informações topográficas ajustando também os dados do radargrama em profundidade. Aplicou-se então a correção topográfica nos perfis com base em dados altimétricos disponíveis para a área imageada.

4.1.2.2. Processamentos Avançados

a) **Ganhos:** Com o intuito de aplicar um tratamento às respostas dos sinais emitidos, bem como recuperar o ganho dos sinais na frequência adotada, efetuou-se a compensação linear ou exponencial dos sinais de maneira a amplificar a resolução da imagem e favorecer a identificação de refletores de baixa intensidade. A Figura 23 ilustra a condição de um radargrama antes e depois da aplicação da compensação sobre os refletores.

b) **Filtros:** A fim de melhorar a resolução da imagem do radargrama utilizou-se da aplicação de filtros verticais para redução de ruídos de alta e baixa frequência a partir da verificação do espectro de frequência de dados.

Os filtros disponíveis no *software* de processamento adotado referem-se aos métodos retangular e triangular (filtros *FIR – Finite Impulse Response*). Um filtro *FIR* trata-se de um filtro digital linear caracterizado pela duração finita de seu sinal de entrada, o impulso.

O método retangular (*boxcar*) é baseado numa função de média simples determinada através da zona de corte de frequências desejada (passa banda) e aplicada a janelas amostrais retangulares.

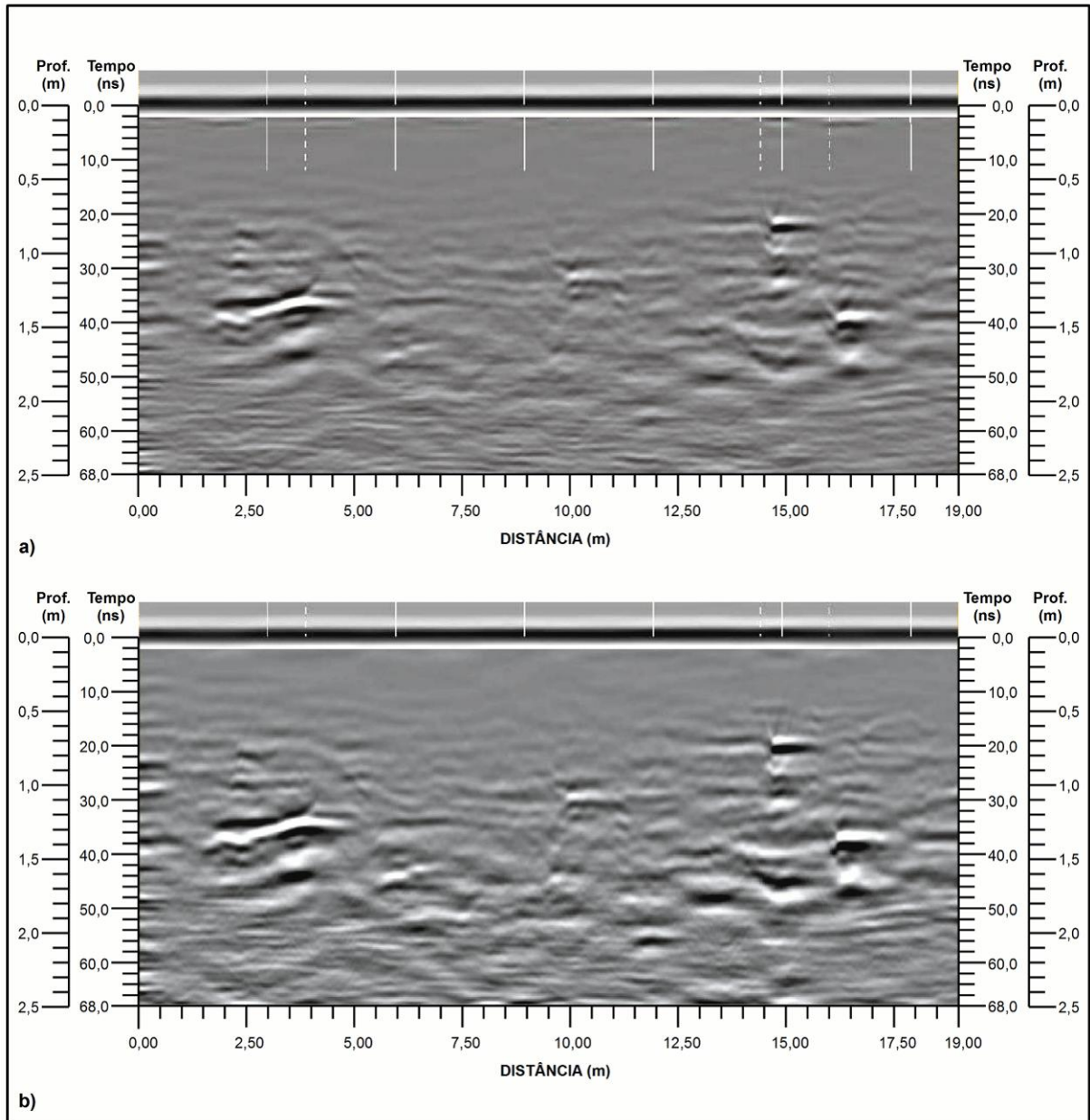


Figura 23 – a) Radargrama em processamento sem a aplicação de compensação sobre os refletores; b) Radargrama em processamento após a aplicação de compensação sobre os refletores.

Por sua vez, o método triangular (*Bartlett*) considera uma média ponderada sobre a zona de corte de frequências, destacando o ponto central do filtro (frequência central da zona de corte), aplicando a função a janelas amostrais triangulares (GSSI, 2009). A Figura 24 ilustra a condição de um radargrama antes e depois da aplicação de um filtro *FIR*.

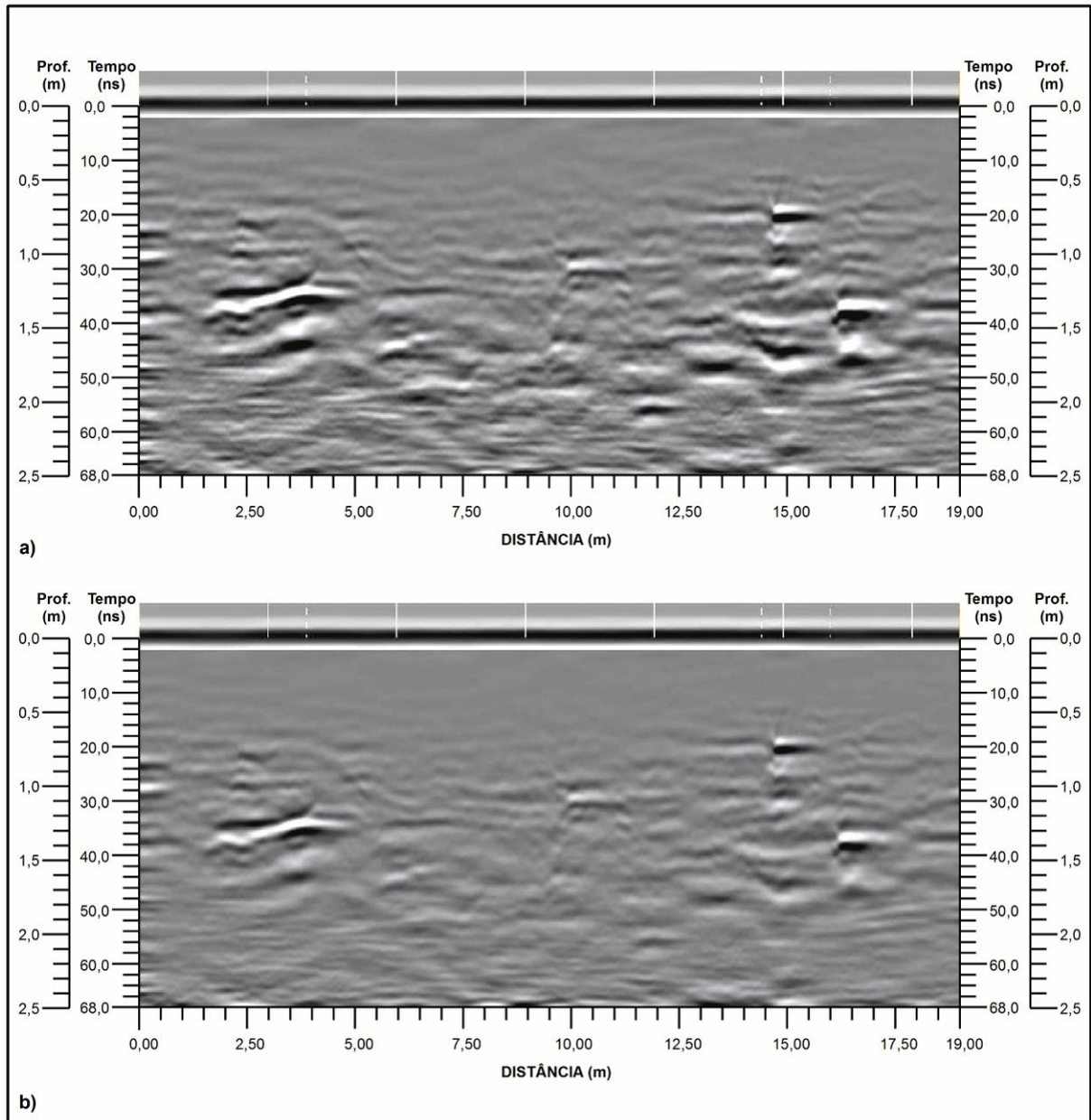


Figura 24 – a) Radargrama em processamento sem a aplicação de filtros *FIR*; b) Radargrama processado após a aplicação de filtros *FIR*.

4.1.3. Interpretação dos Dados de Imageamento

A interpretação com elaboração dos perfis pedológicos foi efetuada utilizando-se dos softwares Radan 6.6™ e AutoCAD Map 2010™, a partir da demarcação das camadas subsuperficiais com base na análise de configurações de reflexões em conjuntos ou zonas refletoras e auxiliada pelo reconhecimento de mudanças de fase da onda eletromagnética através de traços pontuais de radargrama.

Sendo o método de imageamento do Georadar semelhante ao método da perfilagem sísmica, baseando-se na configuração estratigráfica de camadas, a interpretação dos dados se apropria da mesma lógica ao considerar os contrastes de reflectância e atenuação dos sinais entre os volumes pedológicos da seção. Isto, tendo em vista que em geral os solos mantêm a estrutura do material parental (rocha matriz) e a interpretação considera as respostas às mudanças de fase da onda eletromagnética quando ocorre mudança de um meio para outro (horizontes) em subsuperfície, como bem ilustra a Figura 25.

Esse contraste entre os horizontes pedológicos está diretamente ligado às diferenças de permissividades dielétricas induzidas pelas propriedades físico-químicas dos solos, permitindo a fácil distinção entre os volumes organo-mineral e mineral em função das diferentes intensidades e densidades dos refletores.

Entretanto, considerando a tênue variação entre os horizontes diagnósticos de subsuperfície e os de alteração, devido principalmente às possíveis reflectâncias induzidas por propriedades físicas semelhantes, ainda que tenham em sua constituição materiais de natureza distinta, tais como a presença predominante de clastos e maior concentração de minerais primários no horizonte de alteração, fez-se necessário o uso de ferramentas de prospecção tradicionais, como o trado manual para a caracterização das geometrias em profundidade.

A partir das curvas de reflexão das guias de profundidade, introduzidas nos limites entre os volumes dos solos, e da comparação visual nos traços pontuais dos radargramas (dispostos a cada 2,5 m durante toda a extensão do perfil), através da observação das mudanças de fase das ondas, foi possível definir com maior segurança as espessuras dos horizontes.

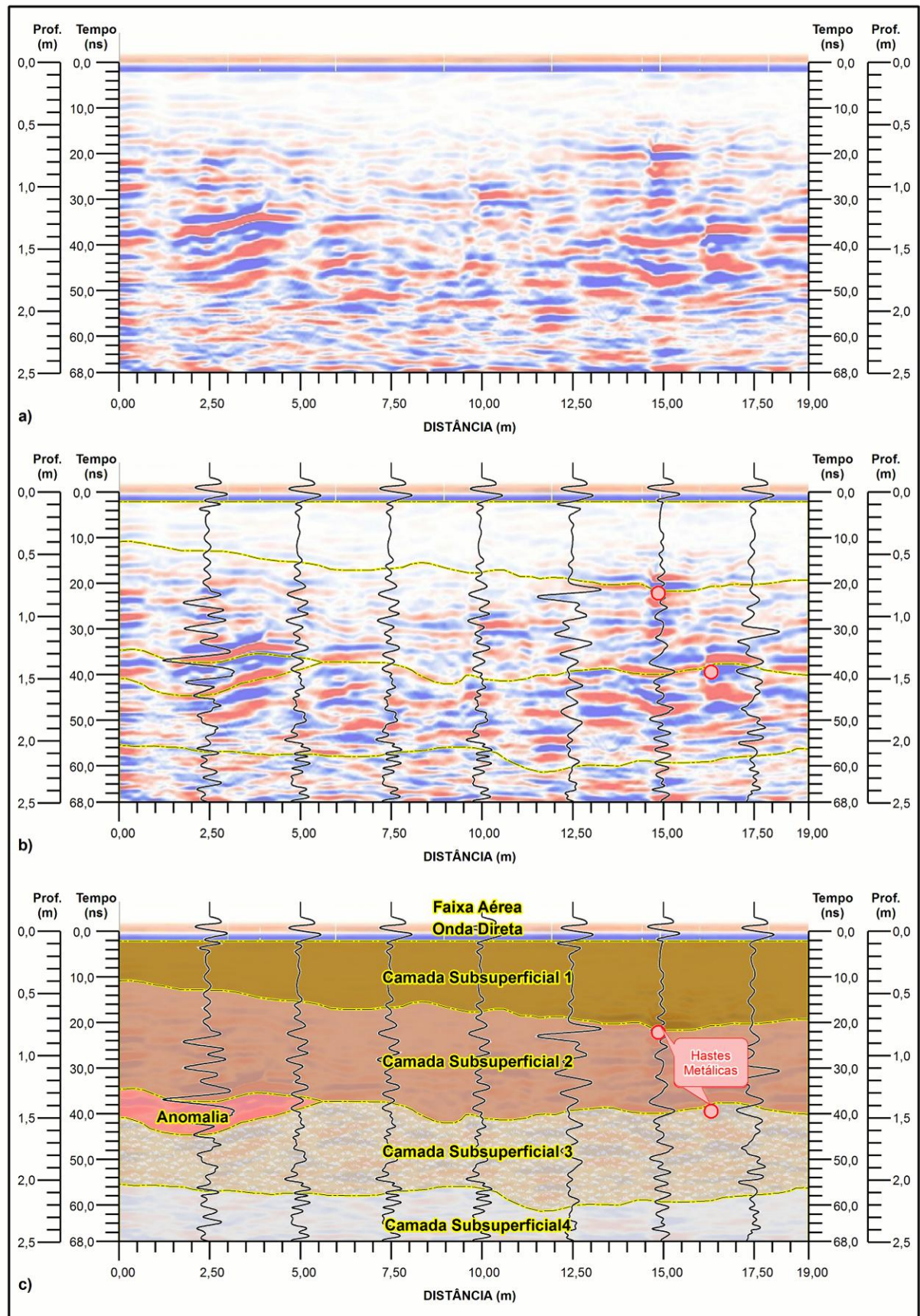


Figura 25 – a) Radargrama processado; b) Radargrama em interpretação: os traços verticais representam a configuração da onda em subsuperfície (traços pontuais), enquanto os traços sub-horizontais representam a delimitação entre camadas; c) Radargrama interpretado: perfil pedológico.

Adotou-se o modo de visualização em cores, de maneira que as amplitudes positivas dos refletores são representadas em vermelho e as amplitudes negativas representadas em azul. Por sua vez, as amplitudes nulas são identificadas pela cor branca. A Figura 26 ilustra a composição de um traço de radargrama, representando as fases positiva e negativa da onda eletromagnética.

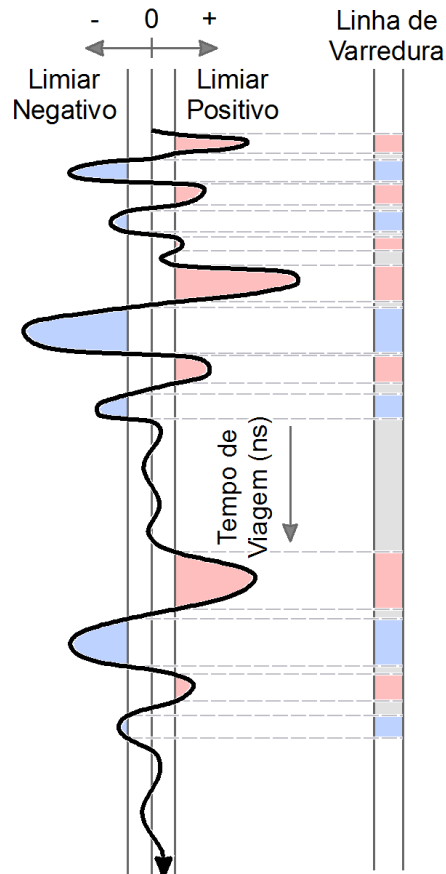


Figura 26 – Traço Pontual de Radargrama: As amplitudes positivas são representadas em vermelho, enquanto as amplitudes negativas em azul (adaptado de Ludwig *et al.*, 2011).

Para a interpretação dos radargramas, utilizou-se da abordagem estratigráfica para estudos sedimentológicos conforme demonstrado por Neal (2004) em adaptação para o entendimento pedológico. O referido autor trata cada camada estratigráfica como uma unidade de radar, ou fácies de radar, cada qual apresentando características específicas em relação às geometrias de reflexão de suas superfícies nos limites superior e inferior.

Também são definidas as distintas configurações de reflexão considerando o comportamento ou disposição dos refletores em subsuperfície, conforme os elementos e sugestões para a segmentação dessas unidades. A proposta de Neal (2004) para a segmentação das unidades de radar tem sua representação gráfica apresentada pela Figura 27.

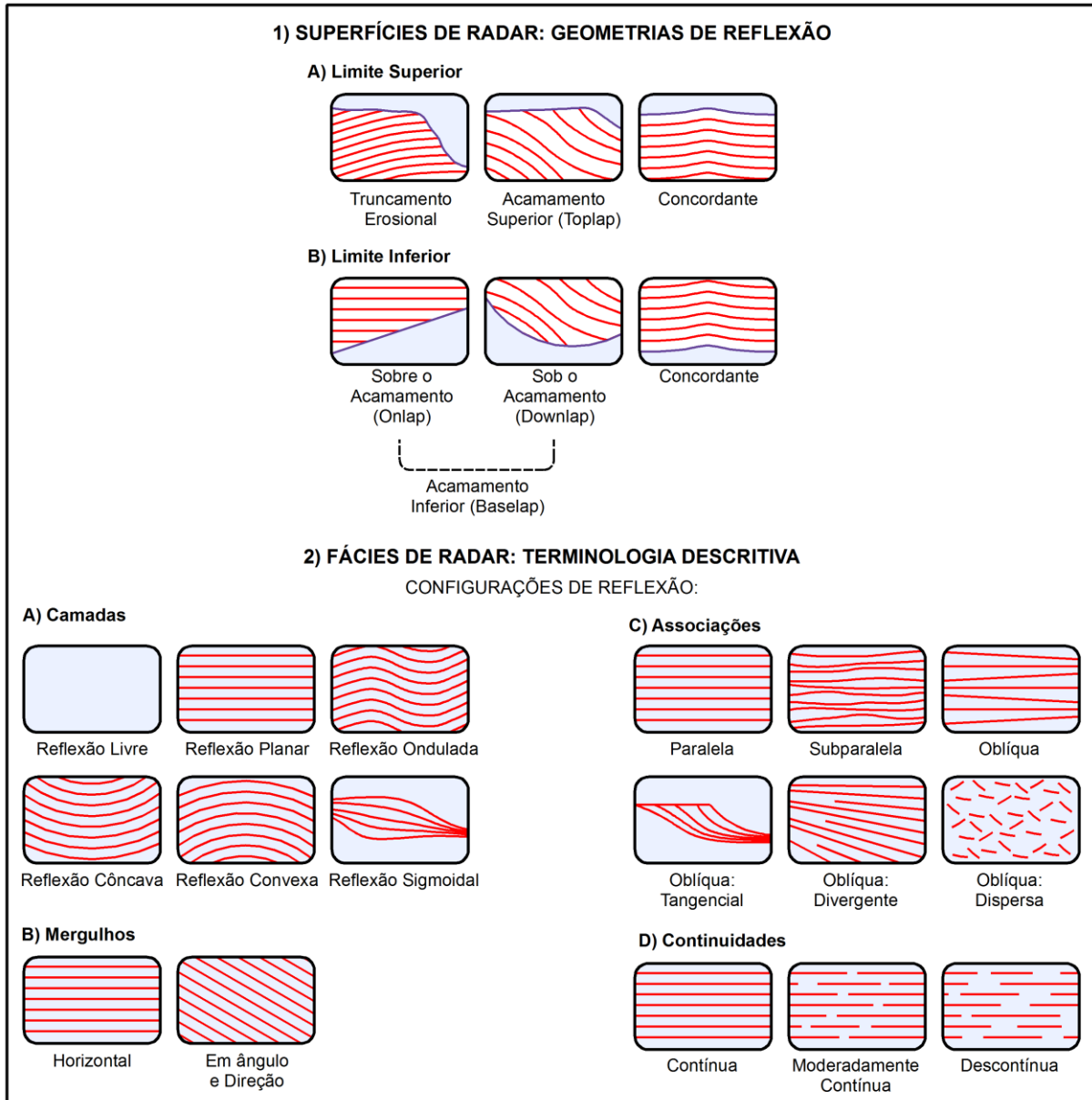


Figura 27 – Elementos para a interpretação de camadas estratigráficas em radargramas para estudos sedimentológicos (adaptado de Neal, 2004).

Assim, com o intuito de padronizar o procedimento de interpretação dos radargramas e determinar uma terminologia descritiva simplificada, cada horizonte pedológico é tratado como uma unidade de radar, ou zona refletora, definidas em razão das configurações de reflexão conforme apresentadas pela Figura 28.

São consideradas, portanto, as configurações de reflexão em relação às disposições dos refletores (paralela, subparalela e oblíqua) e suas continuidades (contínua, moderada e descontínua).

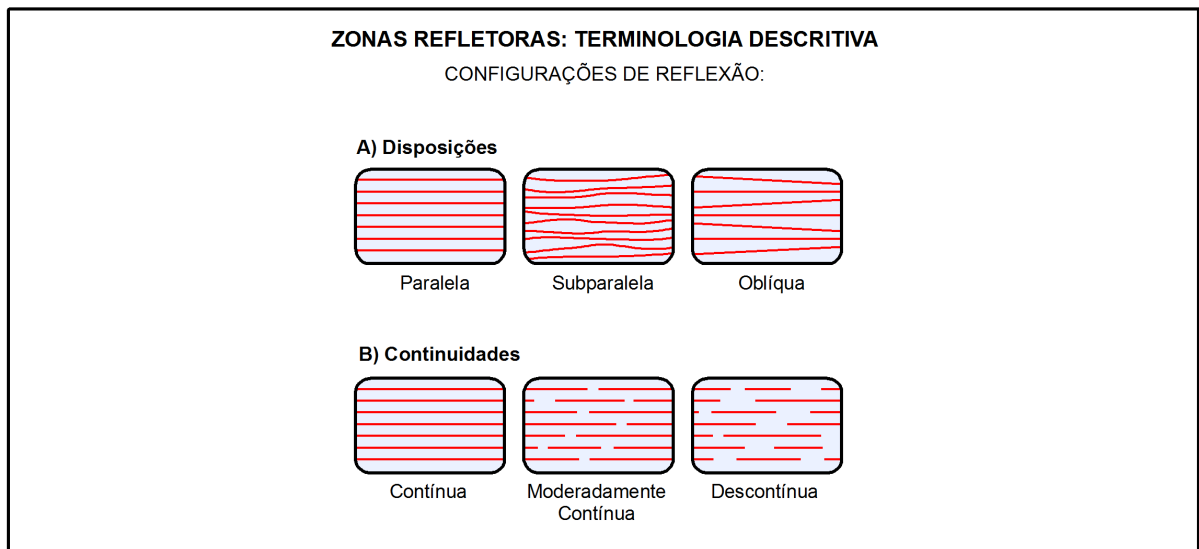


Figura 28 – Elementos para a interpretação das zonas refletoras em radargramas para estudos pedológicos (modificado de Neal, 2004).

5. RECONHECIMENTO DA GEOMETRIA DE SOLOS COM USO DO GEORRADAR

Apresenta-se a seguir, a caracterização dos diferentes tipos de solos imageados, bem como a análise dos dados adquiridos pelo Georradar a partir da identificação das principais configurações de reflexão para cada horizonte pedológico. E, com base na interpretação dos radargramas, apresenta-se também a elaboração dos perfis pedológicos.

5.1. ESPODOSSOLOS

5.1.1. Caracterização da Área em Prospecção

A prospecção eletromagnética em Espodosolos foi efetuada no litoral paranaense na Floresta Estadual do Palmito, localizada no município de Paranaguá (Figura 29) recobrimdo 530,00 ha de área e com acesso principal pela rodovia PR-407.

O ponto de estudo está inserido sobre as coberturas sedimentares marinhas (restingas) e deltaicas (manguezais) do Cenozóico (MINEROPAR, 2005). Do ponto de vista geomorfológico, segundo Santos *et. al.* (2006), está situado na planície costeira do litoral paranaense, compreendendo os terraços marinhos do Pleistoceno Superior e Planícies de Maré sob influência do rio dos Corrêias e do rio dos Almeidas.

Os Espodosolos Humilúvicos são definidos como solos que apresentam húmus ácido e intensa translocação de matéria orgânica para o horizonte B. São descritos como solos minerais apresentando horizonte B espódico (Bh) logo abaixo de um horizonte eluvial E, o qual pode ser ou não álbico, ou subjacente a horizonte hístico com menos de 40cm de espessura (EMBRAPA, 2013). Apresentam usualmente sequência de horizontes A, E, Bh, Bhs ou Bs e C, com nítida diferenciação de horizontes, e têm sua gênese concentrada em áreas de planícies de restingas.

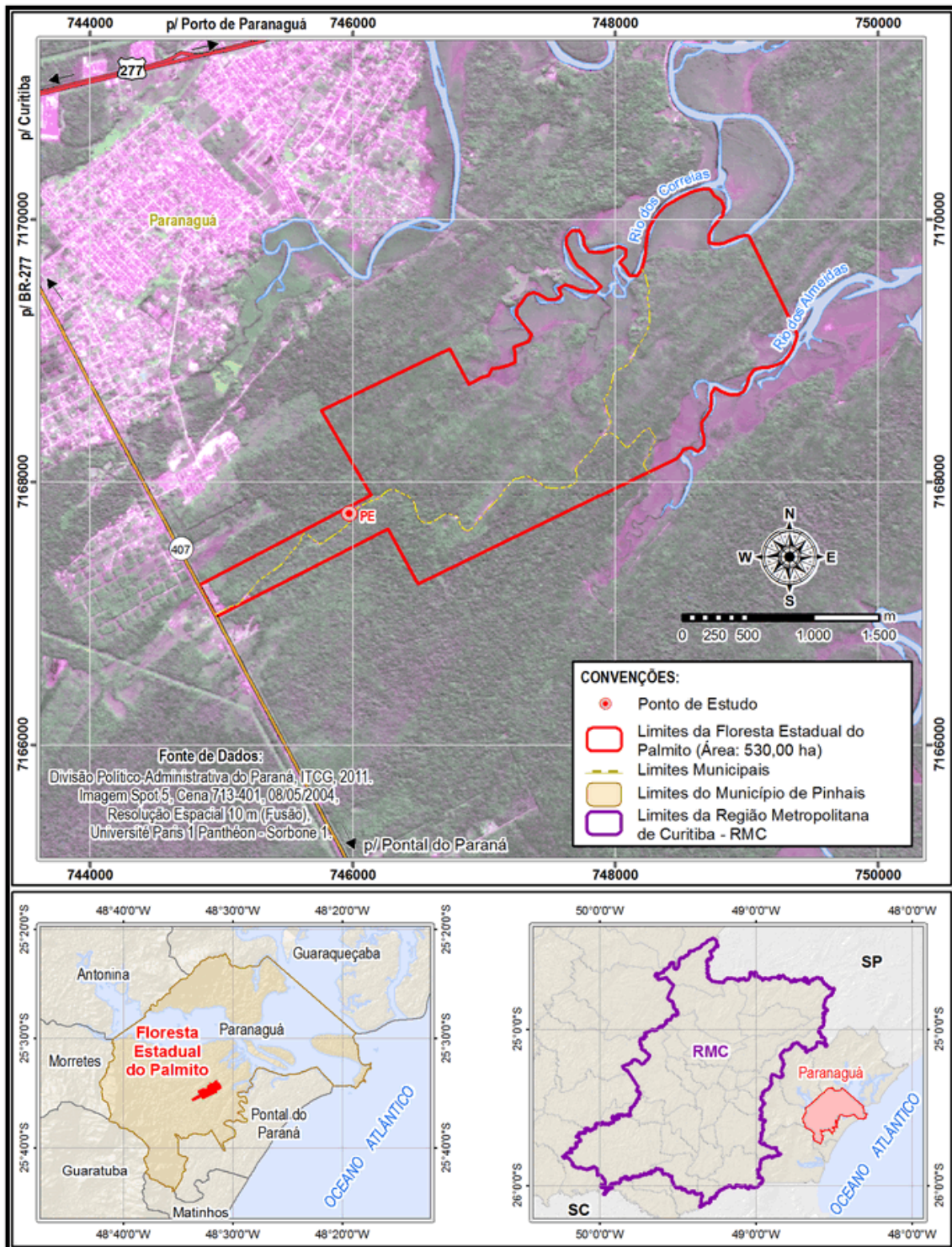


Figura 29 – Mapa de localização da Floresta Estadual do Palmito.
(Org. Orestes Jarentchuk Junior).

O perfil de imageamento se deu sobre uma trilha com 19,50 m de extensão, a qual termina em um corte “C” de estrada (Figura 30b) passando por uma trincheira de observação de solos representada pela zona de observação “T” (Figura 30a) nos perfis dos radargramas. Além disso, tanto na trincheira quanto no corte ao fim da trilha foram implantadas as hastas metálicas nos limites entre os horizontes E e Bh.

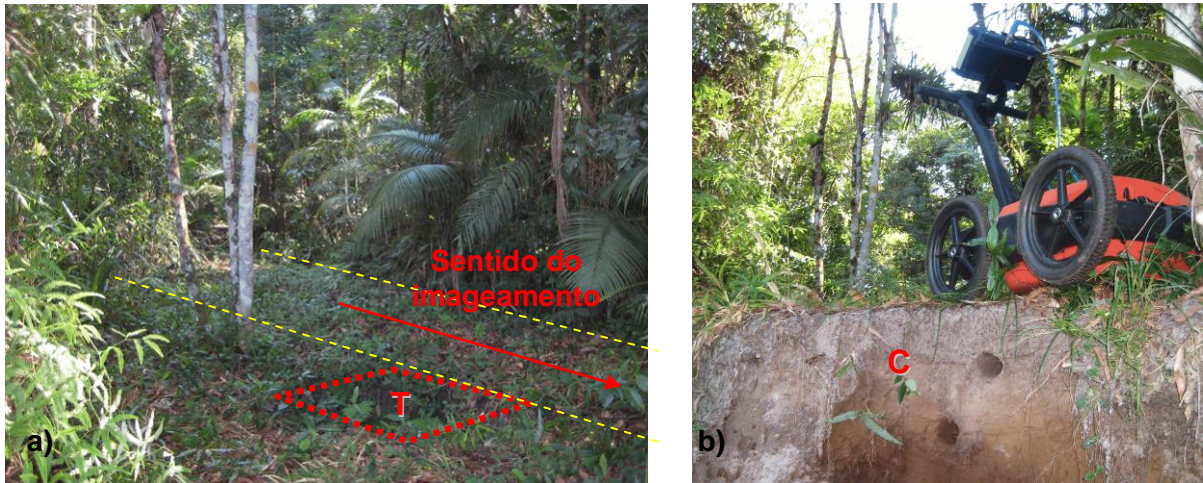


Figura 30 – a) Trilha de imageamento com identificação da trincheira de observação “T”. b) Fim da trilha de imageamento com identificação da zona de observação em corte “C”.

5.1.2. Descrição dos Perfis Pedológicos

Para a trincheira de observação foram possíveis de caracterizar três horizontes pedológicos conforme ilustra a Figura 31, sendo sua descrição apresentada resumidamente pelo Quadro 12.

O horizonte A apresenta-se com apenas 6 cm de espessura e reflete uma condição de paisagem bastante alterada, por se tratar de um trilha a vegetação original sofreu supressão e em seu lugar crescem espécies rasteiras em meio a uma cobertura de serrapilheira. Sua textura é arenosa e possui coloração acinzentada (5Y 5/1).

Subjacente ao horizonte A, observa-se um horizonte de caráter eluvial (E) em transição difusa, apresentando cor cinza-avermelhada (5Y 5/2), com textura arenosa e espessura de aproximadamente 23 cm. O horizonte B espódico (Bh1) é marcado por uma transição abrupta, sua cor é bruno-avermelhada (5Y 4/3),

possuindo textura também arenosa, mas com material fracamente cimentado, quando comparado com os horizontes superiores, e espessura superando a 50 cm.

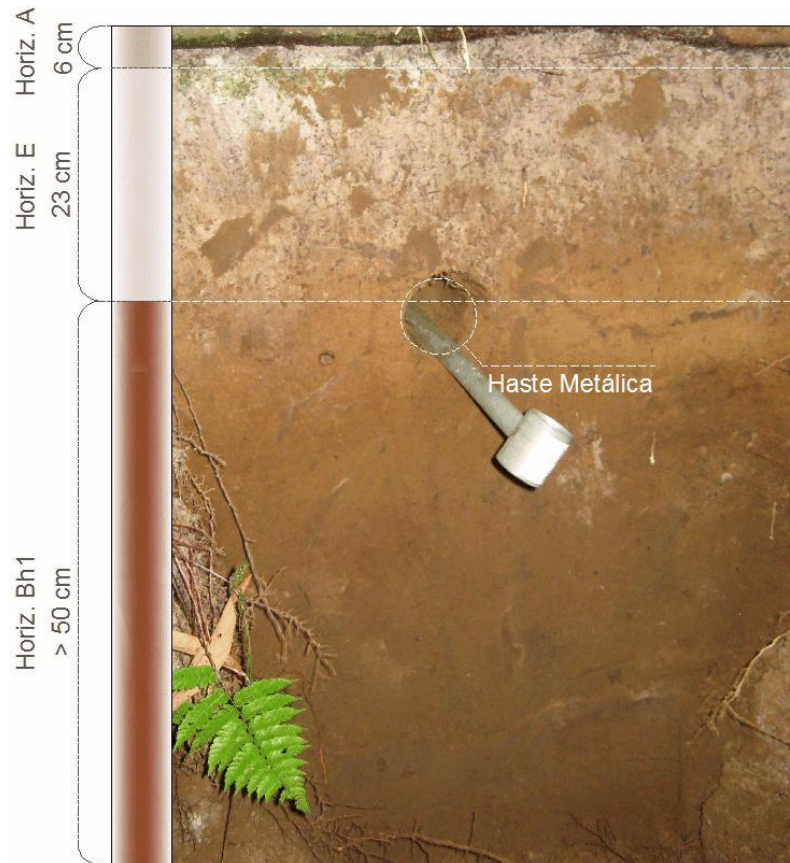


Figura 31 – Perfil pedológico da trincheira T.

Horizonte	Prof. (m)	Cor (Munsell)	Textura	Cimentação
A	0 a 0,06	5Y 5/1 Acinzentado	Arenosa	-
E	0,06 a 0,29	5Y 5/2 Cinza avermelhado	Arenosa	-
Bh1	> 0,29	5Y 4/3 Bruno avermelhado	Arenosa	Fraca

Quadro 12 – Descrição dos horizontes pedológicos da trincheira “T”.

Em observação do perfil em corte de estrada, findando a trilha de imageamento, tornou-se possível a caracterização de quatro horizontes pedológicos ilustrados pela Figura 32 e descritos em resumo pelo Quadro 13.

O horizonte A apresenta-se com coloração acinzentada (5Y 5/1) possuindo espessura de quase 20 cm e textura arenosa. Em transição difusa observa-se na sequência um horizonte eluvial (E) com pelo menos 27 cm de espessura, com alteração visível na cor em comparação com o horizonte superior definida por 5Y 5/2 (cinza-avermelhada), porém mantendo uma textura arenosa.

Em transição abrupta, com forte mudança na coloração, ainda que a textura se mantenha arenosa, mas já com material fracamente cimentado, tem-se um horizonte B espódico (Bh1) à semelhança daquele encontrado na zona de observação em trincheira, possuindo cor bruno-avermelhada (5Y 4/3). Desenvolve-se em espessura de até 80 cm, quando ocorre outra mudança visual abrupta na coloração, possivelmente em consequência do acúmulo de matéria orgânica, sendo definida como bruno-escura (10YR 3/3), mas mantendo textura arenosa e material fracamente cimentado, constituindo um segundo horizonte B espódico (Bh2).

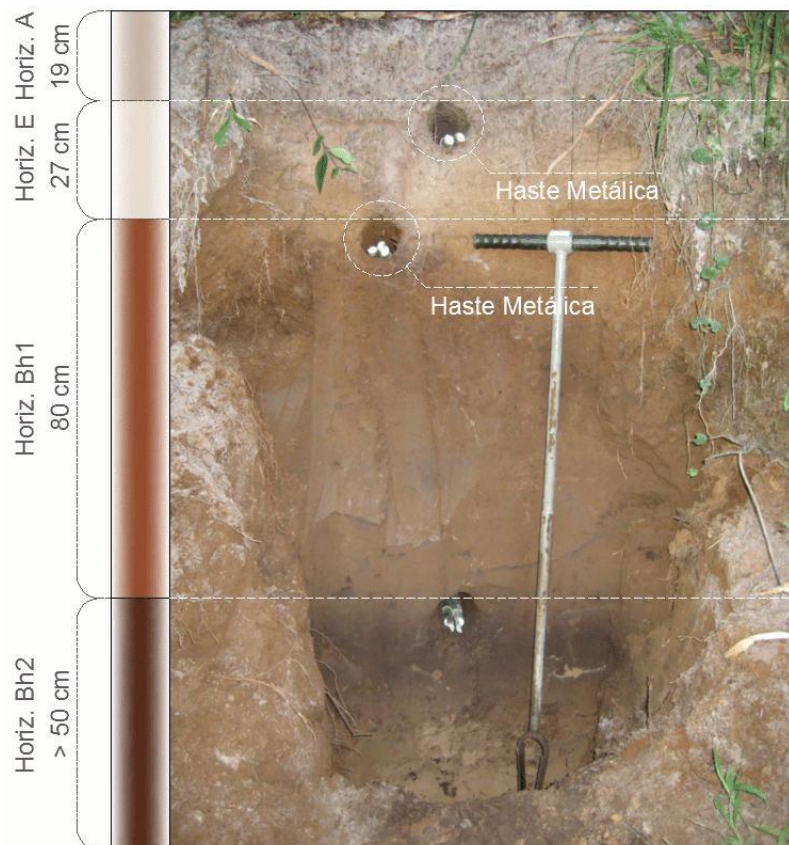


Figura 32 – Perfil pedológico corte C.

Horizonte	Prof. (m)	Cor (Munsell)	Textura	Cimentação
A	0 a 0,19	5Y 5/1 Acinzentado	Arenosa	-
E	0,19 a 0,46	5Y 5/2 Cinza- avermelhado	Arenosa	-
Bh1	0,46 a 1,26	5Y 4/3 Bruno- avermelhado	Arenosa	Fraca
Bh2	> 1,26	10YR 3/3 Bruno- escuro	Arenosa	Fraca

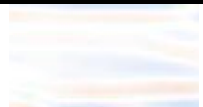



Quadro 13 – Descrição dos horizontes pedológicos da zona de observação em corte de estrada (C).

5.1.3. Interpretação dos Perfis em Radargramas





Com base na caracterização das duas zonas de observação para esse transecto de imageamento, procurou-se reconhecer os mesmos volumes pedológicos no radargrama.

Foram identificados pelo menos quatro diferentes padrões de refletores que representam os horizontes reconhecidos em campo, conforme apresentam em resumo os quadros Quadro 14 e Quadro 15. A Figura 33 ilustra em detalhe os radargramas nas posições das zonas de observação (trincheira e corte).

Para auxiliar na demarcação das superfícies de transição entre os horizontes foram consideradas as representações das mudanças de fase das ondas eletromagnéticas em função das diferenças de propriedades entre um volume e outro em subsuperfície, representadas pelos traços pontuais de radargrama (traços “a” a “g”) indicados nos perfis da Figura 34.

Zonas Refletoras		Horizontes	Espessuras (m)	Tempo (ns)
ZR1		A + E	0,30	0 a 4,2
ZR2		Bh1	0,95	4,2 a 19,9
ZR3		Bh2	0,70	19,9 a 31,8
ZR4		C	> 1,00	31,8 a 50,0
		Velocidade Média (m/ns)	0,13312	
		Constante Dielétrica (k)	5,1	

Quadro 14 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodosolos.

Zonas Refletoras		Horizontes	Espessuras (m)	Tempo (ns)
ZR1		A + E	0,45	0 a 7,8
ZR2		Bh1	0,80	7,8 a 21,2
ZR3		Bh2	0,80	21,2 a 34,4
ZR4		C	> 1,00	34,4 a 50,0
		Velocidade Média (m/ns)	0,13312	
		Constante Dielétrica (k)	5,1	

Quadro 15 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodosolos.

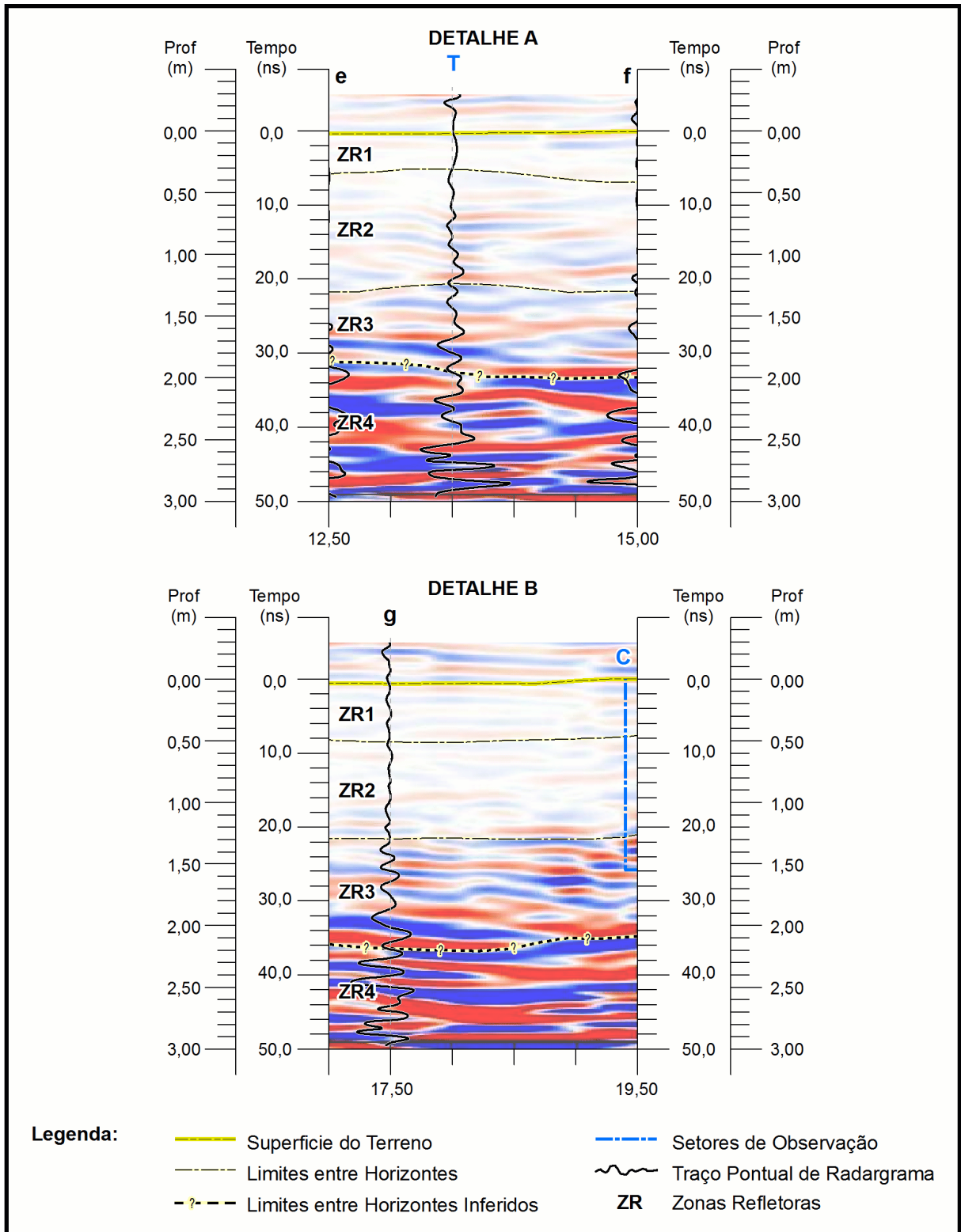


Figura 33 – Identificação das zonas refletoras sobre o radargrama para as posições da trincheira (detalhe A) e do corte (detalhe B).

A primeira zona refletora (ZR1), delimitada tanto para a posição de observação em trincheira (T) quanto em corte (C), corresponde aos horizontes A e E, os quais possivelmente em função de apresentarem propriedades de resistividade semelhantes não permitiram sua distinção no radargrama. Esta zona refletora é caracterizada por refletores de baixa intensidade apresentando predominantemente configurações de reflexão em disposição paralela a subparalela com moderada continuidade.

A partir do refletor demarcado entre 4,2 ns e 7,8 ns, respectivamente nas profundidades de 0,30 m e 0,45 m e coincidindo com os locais de implantação das hastes metálicas em T e C, é possível identificar o limite entre os volumes pedológicos correspondentes aos horizontes espódico (Bh1) e sobrejacentes (A e E).

Para a segunda zona refletora (ZR2) ainda são reconhecidos refletores de baixa intensidade, dispostos predominantemente de maneira subparalela e com moderada continuidade. Observando-se os traços pontuais de radargrama, verifica-se que há uma sutil variação nas amplitudes dos refletores em acréscimo de profundidade, implicando na elevação de intensidade, possivelmente em função do acréscimo de matéria orgânica que migrou dos horizontes sobrejacentes.

Com base no local de observação em corte, é possível delimitar uma terceira zona refletora (ZR3) correspondente a um segundo horizonte espódico (Bh2), distinto do primeiro (Bh1) devido ao visível incremento de matéria orgânica, comprovado pelo escurecimento de sua coloração, de bruno-avermelhada para bruno-escura.

Observa-se através dos traços pontuais o aumento de amplitudes dos refletores a partir da profundidade média de 1,25 m, entre 19,9 ns e 21,2 ns. A ZR3 é caracterizada por refletores de maior intensidade, predominando configurações de reflexão subparalelas a oblíquas e apresentando-se de maneira contínua.

Por fim, o quarto volume pedológico referente ao horizonte C é delimitado a partir da profundidade média de 2,00 m, entre 31,8 ns e 34,4 ns. Delimitou-se então a zona refletora ZR4, para a qual se identificaram refletores de maior intensidade em disposição subparalelas e contínuos.

A velocidade média de propagação das ondas eletromagnéticas para o solo imageado foi de 0,13312 m/ns, permitindo a definição da constante dielétrica para o Espodossolo nesse ponto de estudo como sendo 5,1, em proximidade com o intervalo de valores atribuídos a solos arenosos e secos (4 a 6), segundo estudo desenvolvido por Cassidy (2009).

Os resultados demonstram a aplicabilidade do Georradar para a prospecção eletromagnética em Espodossolos, a qual permitiu a delimitação dos volumes pedológicos observados em campo, com exceção da compartimentação entre os horizontes A e E, conforme discutido na identificação das zonas refletoras.

Observou-se também o condicionamento das intensidades dos refletores em função do incremento de matéria orgânica em profundidade, entendendo que ocorre atividade coloidal alta em virtude de que em solos com texturas arenosas a CTC da matéria orgânica está entre 200 e 300 cmol_c/kg.

Entretanto, o reconhecimento do horizonte C foi inferido, já que não foram efetuadas sondagens diretas para observação abaixo de 1,50 m de profundidade, porém foram identificados refletores que podem traduzir uma condição de saturação hídrica, acarretando em alta condutividade elétrica nesse compartimento.

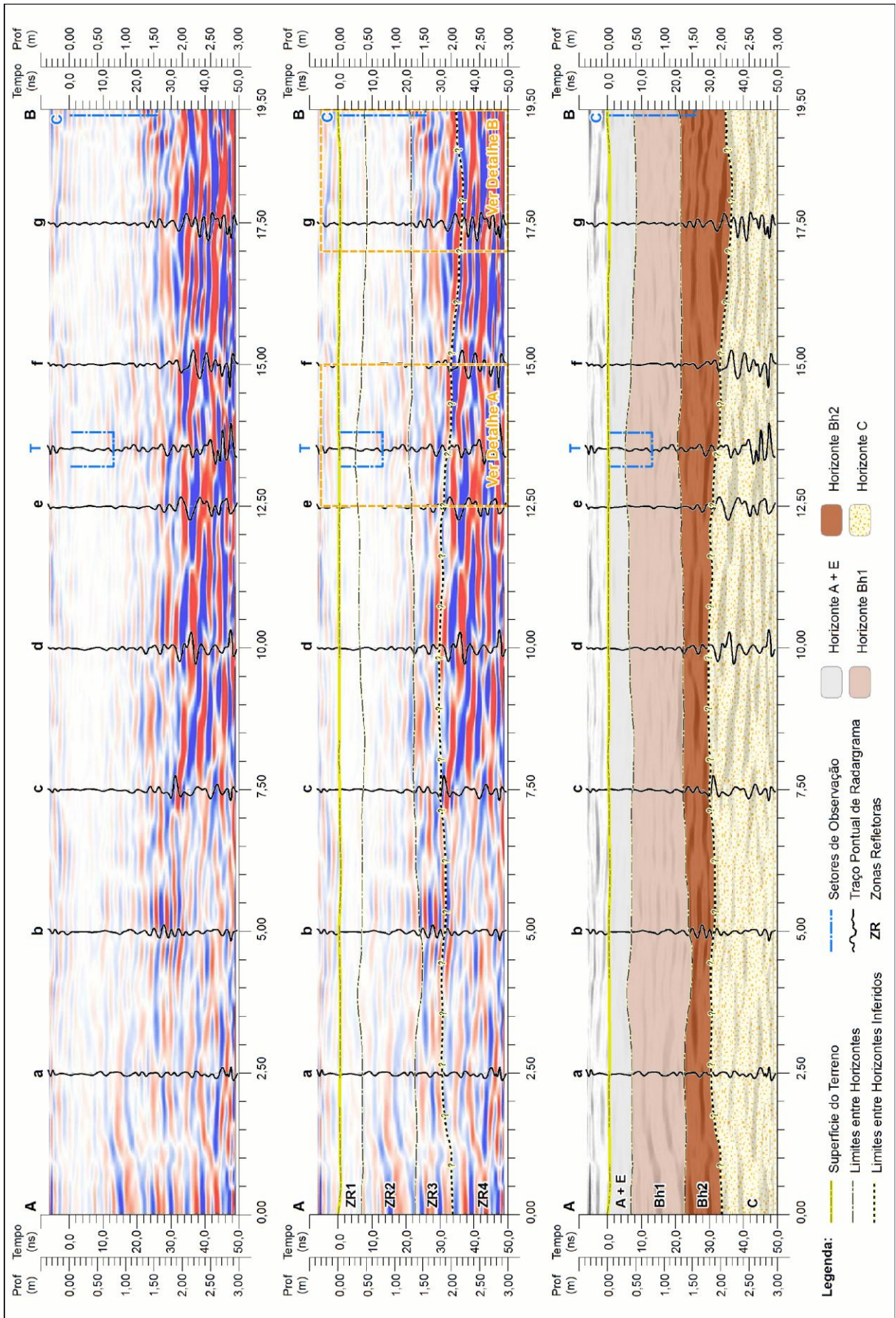


Figura 34 – Interpretação do radargrama processado com identificação das zonas refletoras e definição do perfil pedológico em Espodossolo.

5.2. CAMBISSOLOS

5.2.1. Caracterização da Área em Prospecção

A prospecção eletromagnética em Cambissolos ocorreu na Fazenda Experimental Canguiri, de propriedade da Universidade Federal do Paraná. A fazenda Canguiri possui área de 4,311 km², está integralmente inserida no município de Pinhais no Estado do Paraná, que compõe a Região Metropolitana de Curitiba (RMC), com limites às margens da Barragem do Rio Iraí e divisas com os municípios de Colombo e Piraquara, como é possível verificar na Figura 35.

Do ponto de vista geológico, o ponto de estudo encontra-se inserido na Formação Guabirotuba, sendo composta por argilas, arcósios, areias e cascalhos, estando muito próxima ainda do contato com aluviões provenientes da barragem do rio Iraí (MINEROPAR, 2005), refletindo na geomorfologia local.

Segundo Santos *et al.* (2006), o ponto de estudo está situado em uma área que abrange um grande compartimento geomorfológico, a unidade moesfoestrutural do Cinturão Orogênico do Atlântico, compreendendo uma área definida como unidade morfoescultural do Primeiro Planalto Paranaense, nas proximidades da Planície Fluvial formada pela Barragem do rio Iraí e seus tributários, sendo caracterizada por uma dissecação média com topos alongados e aplainados, vertentes convexas, vales predominantemente em “V” e declividades predominantes menores que 6%.

O Projeto Curitiba (CPRM, 1998), descreve a área como um subdomínio geoambiental formado por um relevo já bastante dissecado, sem indícios de movimentações naturais de massas, com um sistema de drenagem em franco processo de assoreamento, com vales amplos e preenchidos por sedimentos moles e solos orgânicos, por vezes turfosos e hidromórficos, águas lentas e até paradas, com baixa capacidade de transporte.

Os solos nesta região, de um modo geral, possuem uma camada superficial rica em matéria orgânica e alta permeabilidade, o horizonte intermediário é argiloso de pouca permeabilidade e um horizonte inferior também argiloso e de permeabilidade muito baixa.

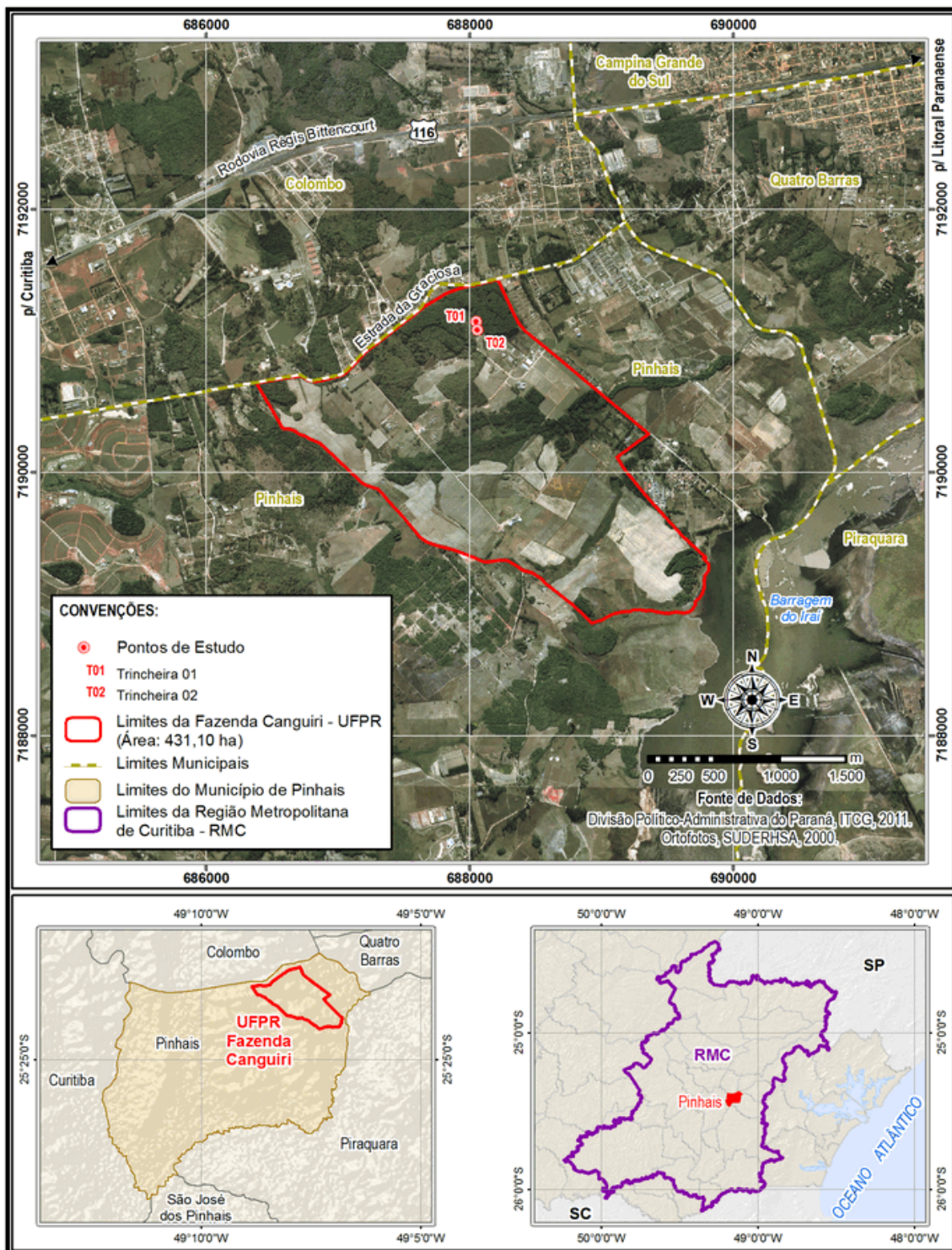


Figura 35 – Mapa de localização da Fazenda Canguiri (UFPR).
(Org. Orestes Jarentchuk Junior).

Os Cambissolos são definidos como solos constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente (Bi) abaixo de qualquer horizonte superficial, quando esses não se enquadrem nas classes dos Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos ou Gleissolos (EMBRAPA, 2013) e entende-se que a variabilidade das condições de sua gênese podem refletir em características também variadas desses solos conforme o local de incidência.

O transecto de imageamento foi efetuado em uma topossequência, ao longo de 88 m de extensão, no sentido de montante à jusante, entre duas trincheiras existentes sob um reflorestamento experimental de pinus (Figura 36a). É notória a diferença de cor entre as trincheiras, sendo possível a verificação no pedocomparador da Figura 36b, e em ambas verificou-se a existência de linhas de seixos (*stonelines*) em uma profundidade aproximada de 70 cm.

A coloração apresenta mudança da trincheira 1 para a 2 com acréscimo de tom brunado no horizonte B, o que pode traduzir um incremento de matéria orgânica para essa porção inferior da vertente, onde o comportamento de propagação da onda eletromagnética também é influenciado.

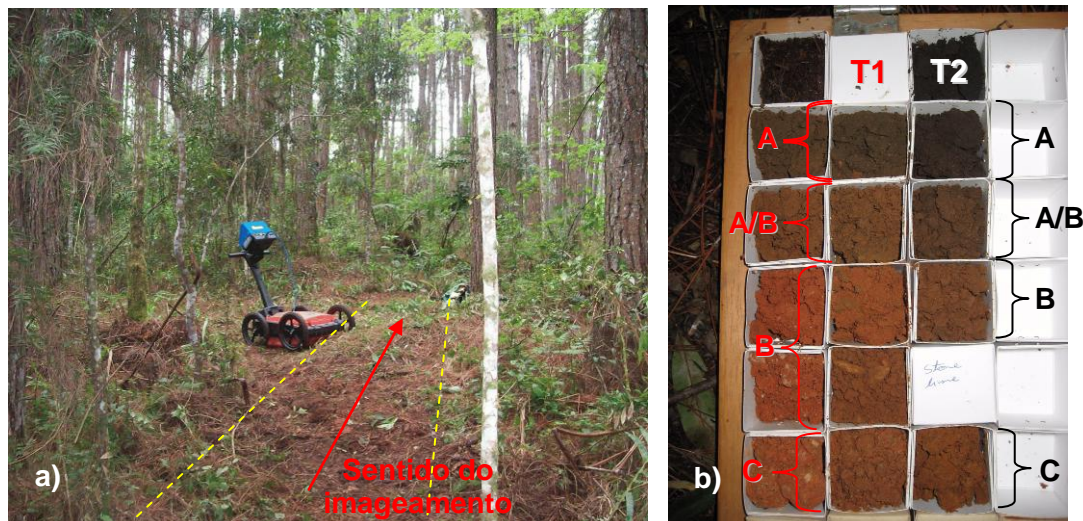


Figura 36 – a) Trilha de imageamento sob reflorestamento experimental de pinus. B) Pedocomparador indicando a diferenciação de cor nos horizontes das trincheiras T1 e T2.

5.2.2. Descrição dos Perfis Pedológicos

Para a trincheira T1, a zona de observação posicionada no início do transecto de imageamento e localizada no terço médio da vertente, foi possível caracterizar quatro horizontes pedológicos conforme ilustra a Figura 37, sendo sua descrição apresentada resumidamente pelo Quadro 16.

O horizonte A apresenta-se com espessura de 22 cm e cor bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2), possuindo textura siltosa, com presença de raízes e atividade biológica. Um horizonte de transição (A/B), definido por uma mudança difusa na coloração do solo entre os horizontes A e B (bruno - 7,5YR 4/4), possui textura média e espessura de 37 cm.

O horizonte B, com espessura de até 50 cm, e por isso enquadrado como horizonte incipiente (Bi), apresenta textura argilosa e cor vermelho-amarelado (5YR 4/6), com presença de clastos constituindo uma linha de pedras (*stoneline*) a 11 cm a partir de seu limite com o horizonte A/B.

Um horizonte C é reconhecido a partir de 109 cm da superfície, mantendo a coloração vermelho-amarelada (5YR 4/6) e a textura argilosa, porém apresentando material alterado com mosqueamento comum (até 5%), pequeno (até 5 mm) e contraste proeminente.

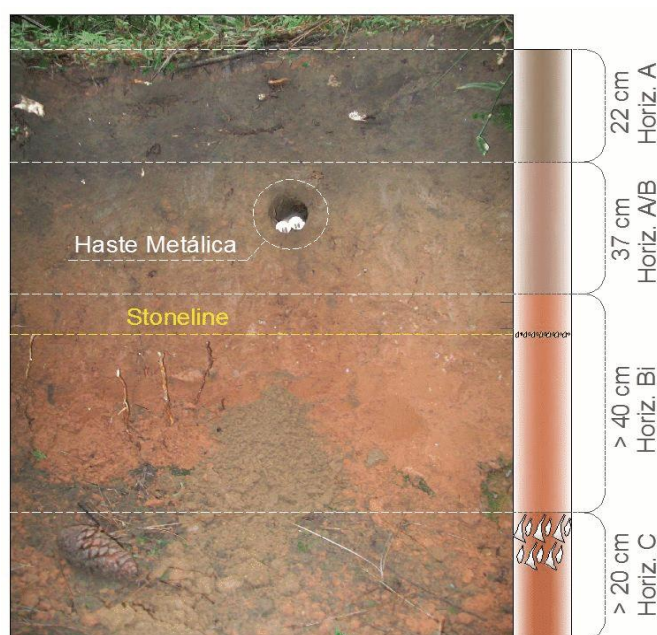


Figura 37 – Perfil pedológico da trincheira T1 (montante).

Horizonte	Prof. (m)	Cor (Munsell)	Textura
A	0 a 0,22	10YR 3/2 Bruno-acinzentado muito escuro	Siltosa
A/B	0,22 a 0,59	7,5YR 4/4 Bruno	Média
Bi	0,59 a 1,09	5YR 4/6 Vermelho-amarelado	Argilosa
C	> 1,09	5YR 4/6 Vermelho-amarelado apresentando mosqueamento	Argilosa

Quadro 16 – Descrição dos horizontes pedológicos da trincheira T1.

Para a trincheira T2, a zona de observação posicionada no fim do transecto de imageamento e no terço inferior da vertente, foram caracterizados três horizontes pedológicos conforme ilustração da Figura 38 e descrição resumida apresentada pelo Quadro 17, com destaque para a presença de clastos já entre o volume do horizonte A/B, a aproximadamente 40 cm da superfície.

O horizonte A é reconhecido com espessura de até 21 cm e cor bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2), apresenta textura siltosa com intensa atividade biológica e raízes. O horizonte de transição (A/B) apresenta-se em caráter difuso com coloração bruno-escuro (7,5YR 3/4), possuindo textura média e espessura de 34 cm.

Na sequência, o horizonte Bi com espessura superior a 40 cm apresenta textura argilosa e cor bruno (7,5YR 4/4). Destaca-se a presença de clastos já entre o volume do horizonte A/B, a aproximadamente 40 cm da superfície.

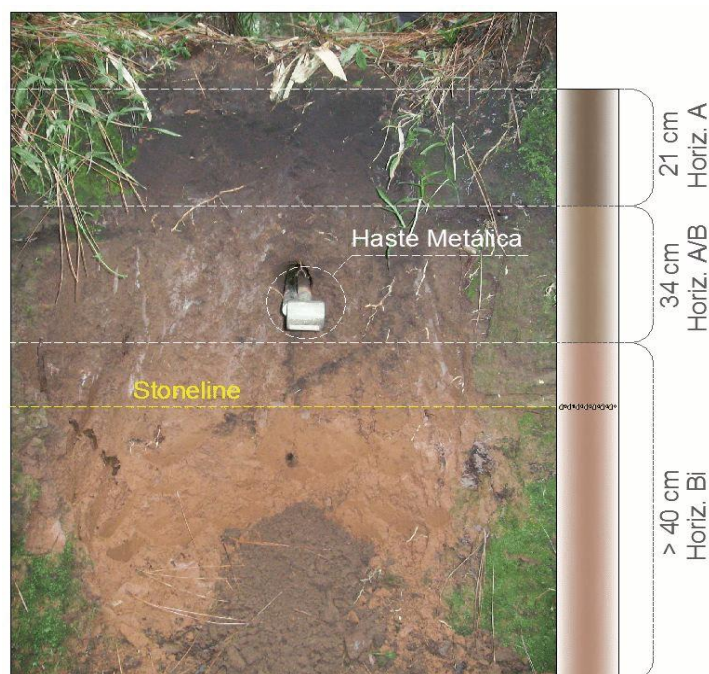


Figura 38 – Perfil pedológico da trincheira T2 (jusante).

Horizonte	Prof. (m)	Cor (Munsell)	Textura
A	0 a 0,21	10YR 3/2 Bruno-acinzentado muito escuro	Siltosa
A/B	0,21 a 0,55	7,5YR 3/4 Bruno-escuro	Média
Bi	> 0,55	7,5YR 4/4 Bruno	Argilosa

Quadro 17 – Descrição dos horizontes pedológicos da trincheira T2.

Para compreender a representação de refletores anômalos no percurso do transecto, e mesmo para auxiliar na interpretação do radargrama em função de sua extensão, foram selecionados dois pontos que exprimem condições distintas de representação nos perfis para prospecções com uso de trado manual, sendo suas

posições nos radargramas possíveis de verificação nos perfis da Figura 44 a Figura 49.

A sondagem ST1, localizada a 20 m do início do perfil, foi efetuada até a profundidade de 150 cm, com a identificação de quatro horizontes pedológicos, conforme resumo do Quadro 18, sendo o horizonte B apresentando predominantemente uma matriz argilosa, conforme ilustra a Figura 39.

O horizonte A alcança espessura de até 30 cm e apresenta cor bruno (10YR 4/3), com textura siltosa a exemplo dos horizontes reconhecidos nas trincheiras T1 e T2, apresentando também raízes e atividade biológica. Sucede-se com um horizonte de transição (A/B), este seguindo por limites difusos com coloração brunada (7,5YR 4/4), com textura média e espessura de 30 cm.

Para o horizonte Bi, este com espessura de até 50 cm, apresenta textura argilosa e cor vermelho-amarelada (5YR 4/6), de acordo com ilustração da figura 27. A presença de clastos é reconhecida no horizonte Bi a partir de 70 cm de profundidade no perfil de sondagem, enquanto no horizonte C o material alterado é representado por mosqueamento comum (até 5%) e pequeno (até 5 mm), com contraste proeminente e tons escuros (Figura 40).

Horizonte	Prof. (m)	Cor (Munsell)	Textura
A	0 a 0,30	10YR 4/3 Bruno	Siltosa
A/B	0,30 a 0,60	7,5YR 4/4 Bruno	Média
Bi	0,60 a 1,10	5YR 4/6 Vermelho- amarelada	Argilosa
C	> 1,10	5YR 4/6 Vermelho- amarelada	Argilosa

Quadro 18 – Descrição dos horizontes pedológicos observados pela sondagem “ST1”.



Figura 39 – Sondagem ST1: predomínio de argila no horizonte B.



Figura 40 – Sondagem ST1: presença de mosqueados com tons escuros no horizonte C.

No que diz respeito à sondagem ST2, esta foi efetuada em profundidade de até 100 cm, a uma distância de 35 m do início do perfil, com a identificação de também quatro horizontes segundo a descrição resumida do Quadro 19, sendo o horizonte B apresentando uma concentração de clastos, conforme identificado na figura 32, a uma profundidade de 60 cm em relação à superfície.

O horizonte A possui espessura de até 20 cm, apresentando coloração bruno-acinzentada muito escura (10YR 3/2), também com textura siltosa e presença de raízes e atividade biológica. É Sucedido por um horizonte de transição (A/B) limites difusos e coloração brunada (7,5YR 4/4), com textura média e espessura de 30 cm. O horizonte B, este com espessura de até 40 cm, voltando a representar um horizonte Bi, possui cor bruno-forte (7,5YR 4/6) e textura argilosa, porém ocorre uma concentração de clastos, conforme identificado na Figura 41, a uma profundidade de 60 cm em relação à superfície.

O horizonte C, identificado a partir de 90 cm de profundidade, apresenta matriz argilosa com coloração bruno-forte (7,5YR 4/6), com material alterado representado por mosqueamento comum (até 5%) e pequeno (até 5 mm), com contraste proeminente e tons escuros.

Horizonte	Prof. (m)	Cor (Munsell)	Textura
A	0 a 0,20	10 YR 3/2 Bruno-acinzentada muito escura	Siltosa
A/B	0,20 a 0,50	7,5 YR 4/4 Brunada	Média
Bi	0,50 a 0,90	7,5 YR 4/6 Bruno-forte	Argilosa
C	> 0,90	7,5 YR 4/6 Bruno-forte	Argilosa

Quadro 19 – Descrição dos horizontes pedológicos observados pela sondagem “ST2”.



Figura 41 – Sondagem ST2: presença significativa de clastos no horizonte Bi.

De maneira geral, observa-se que a textura dos horizontes se mantém ao longo da vertente, porém há um espessamento do horizonte B no setor da sondagem ST1. A coloração dos volumes pedológicos, principalmente em B, apresenta escurecimento no matiz de montante à jusante, muito devido ao incremento de matéria orgânica, possivelmente condicionado pelo escoamento subsuperficial. A presença de clastos é verificada a partir de 70 cm de profundidade em média, característica que parece manter-se constante como uma subsuperfície de pedras (stonelines).

5.2.3. Interpretação dos Perfis em Radargramas




Com base na caracterização das zonas de observação e sondagens auxiliares para o transecto de imageamento, a interpretação dos volumes pedológicos no radargrama é realizada através da identificação das zonas refletoras. Assim, identificaram-se três diferentes padrões de refletores em subsuperfície de modo a representar os horizontes do solo na topossequência, conforme relacionam os quadros Quadro 20 e Quadro 21. Os radargramas respectivos aos detalhes das trincheiras de observação (T1 e T2) são apresentados pela Figura 42, a qual indica o reconhecimento das zonas refletoras referentes aos horizontes pedológicos.

Para a demarcação das superfícies de transição entre os horizontes foram também consideradas as mudanças de fase das ondas eletromagnéticas conforme nos apresentam os traços pontuais de radargrama (“a” a “o”) indicados nos perfis da Figura 44 a Figura 49.




A zona refletora ZR1 corresponde ao horizonte A e com espessura variando entre 0,40 m e 0,45 m apresenta refletores subparalelos com moderadas continuidades e intensidades. O segundo padrão de refletores, que caracteriza a zona refletora ZR2, representa o horizonte B, o qual evidencia o incremento de argila no sistema com alteração marcante na textura de um horizonte para outro, sendo seu limite com o horizonte subjacente entre 10 ns e 13 ns. Para a ZR2 são identificados refletores de maior intensidade dispostos de maneira paralela e com moderada continuidade.

Nota-se que a representação do horizonte de transição A/B é ausente, em função da impossibilidade de distinção dos refletores que delimitariam a mudança de texturas siltosas para média e média para argilosa, tornando evidente apenas a diferenciação entre os horizontes A e B, com incremento na espessura de ambos, descaracterizando o horizonte Bi que passa a alcançar espessuras maiores que 50 cm.

O contato entre os horizontes A e B foi bem definido pelo radargrama e exprime a mudança da resposta de sinal em função da composição do solo no horizonte B, ambiente com teor de argila significativo, e coincide com a profundidade em que foram inseridas as hastas metálicas como guias de profundidade, ignorando também a zona de transição.

Zonas Refletoras		Horizontes	Espessuras (m)	Tempo (ns)
ZR1		A	0,40	0 a 10,0
ZR2		B	0,70	10,0 a 32,0
ZR3		C	> 90	32,0 a 57,0
		Stoneline	Prof. (m): 0,70	20,0
		Velocidade Média (m/ns)		0,07168
		Constante Dielétrica (k)		17,5

Quadro 20 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodosolos.

Zonas Refletoras		Horizontes	Espessuras (m)	Tempo (ns)
ZR1		A	0,45	0 a 13,0
ZR2		B	0,65	13,0 a 32,0
ZR3		C	> 90	32,0 a 54,0
		Stoneline	Prof. (m): 0,70	20,0
		Velocidade Média (m/ns)		0,07168
		Constante Dielétrica (k)		17,5

Quadro 21 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodosolos.

Por sua vez, a zona refletora ZR3, representando o horizonte C, tem seu limite com o horizonte B a partir de 32 ns, em profundidade média de 1,30 m. Apresenta refletores subparalelos com maior intensidade e moderadamente contínuos.

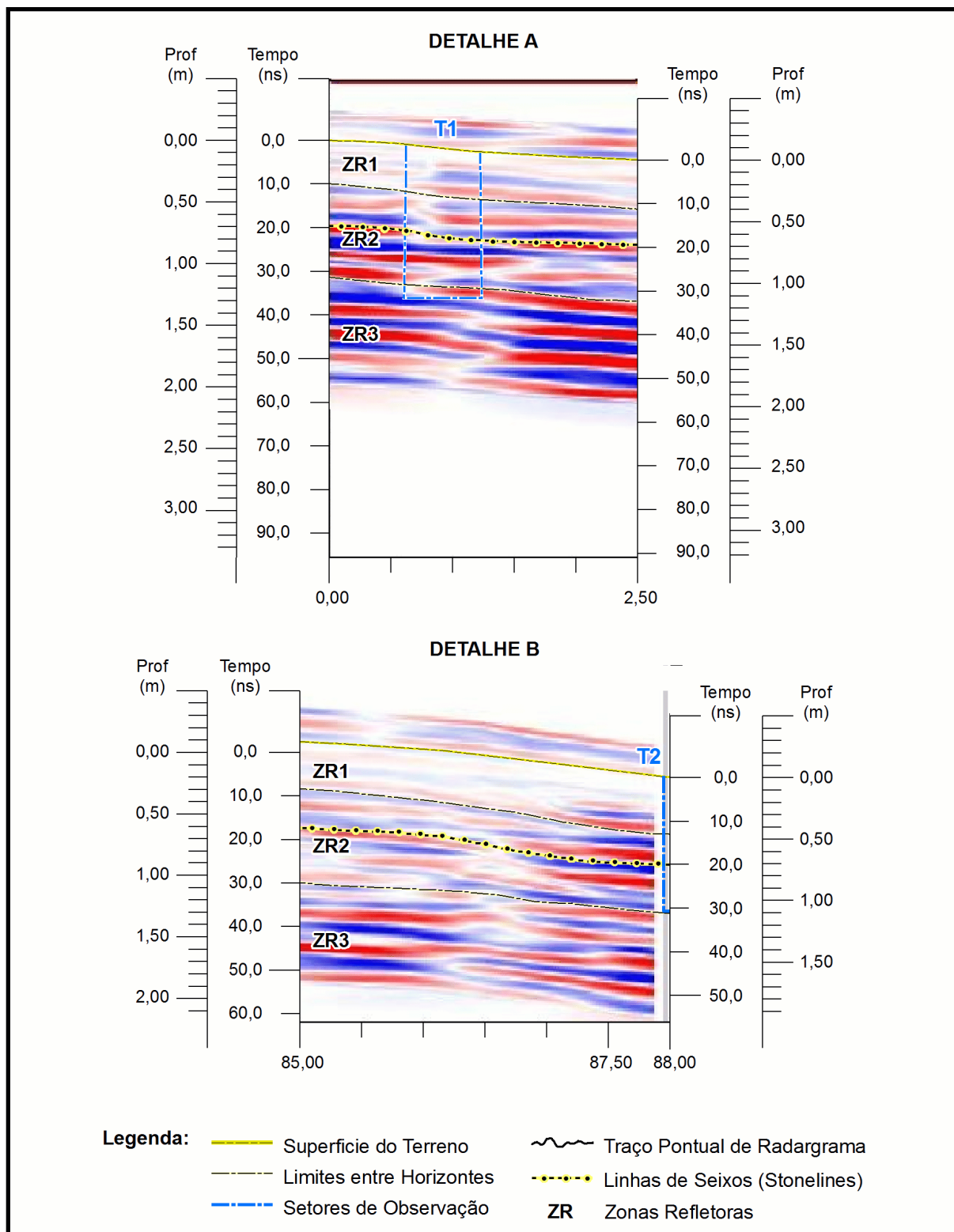


Figura 42 – Identificação das zonas refletoras sobre o radargrama para as posições das trincheiras T1 (detalhe A) e T2 (detalhe B).

Os resultados alcançados também demonstram a aplicabilidade do Georradar para a prospecção eletromagnética em Cambissolos, a qual permitiu a delimitação dos volumes pedológicos observados em campo, com exceção da compartimentação de transição entre os horizontes A e B, conforme mencionado na identificação das zonas de reflexão.

Observou-se também o condicionamento das intensidades dos refletores em função do incremento de argila 2:1, predominante em solos pouco intemperizados e que apresentam atividade alta, assim como da presença de minerais primários em profundidade.

Refletores com profundidade média de 0,70 m em torno de 20 ns foram demarcados com a identificação linhas de clastos, coincidindo com as “stonelines” reconhecidas em campo na mesma profundidade.

A velocidade média de propagação das ondas eletromagnéticas para o solo imageado foi de 0,07168 m/ns, e a constante dielétrica para o Cambissolo desse ponto de estudo possui valor igual a 17,5, concordando com os valores atribuídos por Cassidy (2009) a solos argilosos e saturados (10 a 20).

Em comparação com o trabalho efetuado por Rakssa (2007), com a elaboração da topossequência sobre o mesmo transecto percorrido com o Georradar, porém com a elaboração do perfil pedológico a partir de técnicas convencionais e baseado apenas em dados fornecidos pelas trincheiras e sondagens diretas, verifica-se pouca similaridade na identificação das profundidades dos volumes pedológicos quando comparado ao produto obtido pelos radargramas.

Essa diferença é bastante marcante em relação a espessura no horizonte B do segmento que representa a prospecção efetuada neste trabalho, entre as trincheiras T3 e T4 (trincheiras T1 e T2 consideradas para a construção do radargrama) segundo a Figura 43, em que há uma extrapolação na profundidade alcançada. E isso mostra também que a caracterização de perfis e sondagens a trado pode apresentar imprecisões, visto que as informações obtidas neste estudo através das trincheiras e sondagens coincidentes com aquelas apresentadas por Rakssa, também diferem.

As sondagens a trado intermediárias S6 e S7 efetuadas por Rakssa (2007) correspondem às sondagens ST1 e ST2 indicadas nos radargramas (Figura 44 a Figura 49) respectivamente, corroborando a informação coletada sobre o solo no local, no caso a existência de seixos que interferem na textura da imagem obtida

pelo equipamento. Entretanto, a espessura identificada pelo autor através da sondagem S7 não corresponde à informação obtida pela sondagem ST2.

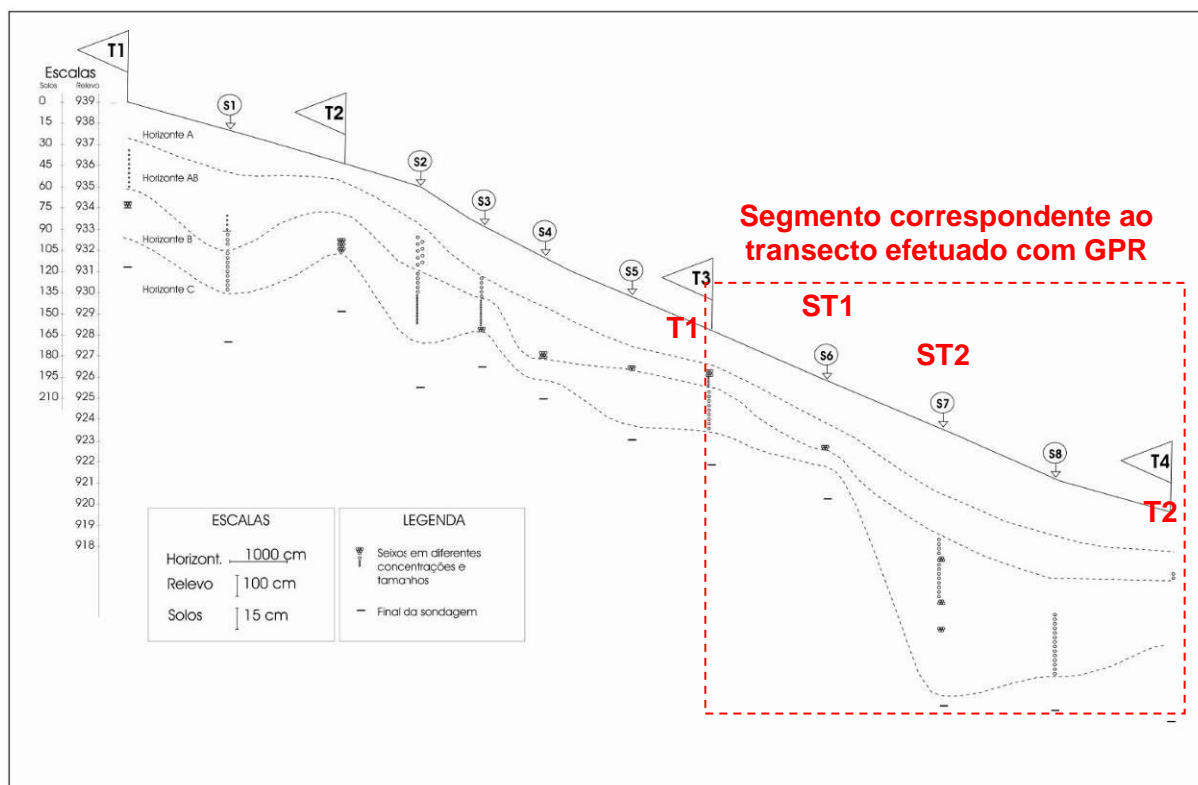


Figura 43 – Distribuição e geometria dos horizontes pedológicos na topossequência da Fazenda Canguiuri e indicação do segmento em prospecção com georradar (adaptado de Rakssa, 2007).

Rakssa (2007), em análise visual e expedita, mantém o horizonte de transição entre os volumes A e B, porém é importante tomar ciência, conforme apontamento de Doolittle & Butnor (2009), de que mudanças sutis nas propriedades físicas do solo, mesmo que sejam perceptíveis a olho nu, não são detectadas pelo Georradar. Tal condição interferiu na interpretação da espessura do horizonte B, para o qual foi somado parte do horizonte de transição, descaracterizando a espessura máxima para enquadramento de um horizonte diagnóstico incipiente (Bi) dos Cambissolos.

Características como a transição gradual entre os horizontes, portanto a cor, assim como os sinais de intemperização da rocha matriz, os tons mosqueados, não são identificáveis nos radargramas.

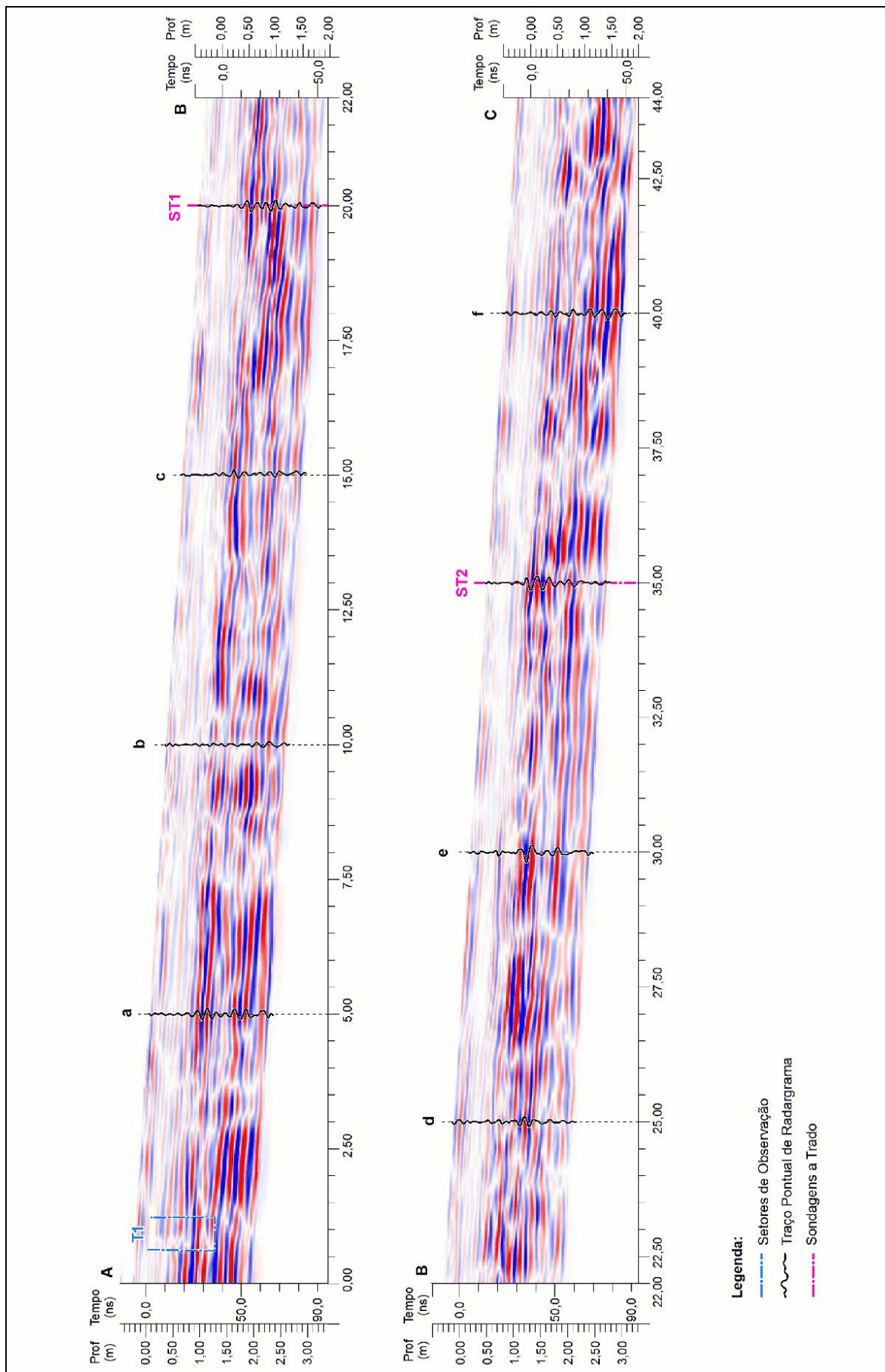


Figura 44 – Radargrama processado com indicação dos traços pontuais (Parte A).

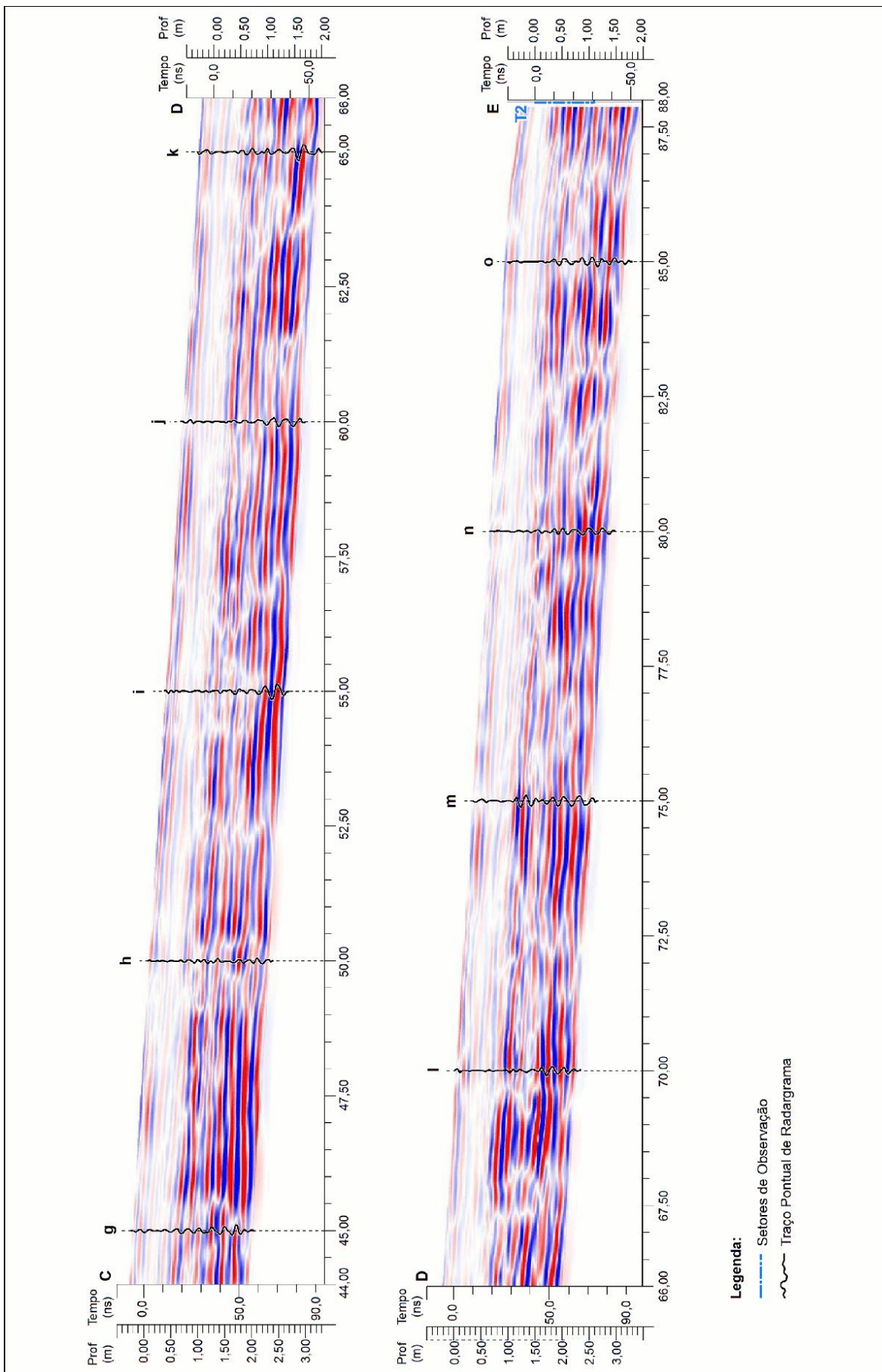


Figura 45 – Radargrama processado com indicação dos traços pontuais (Parte B).

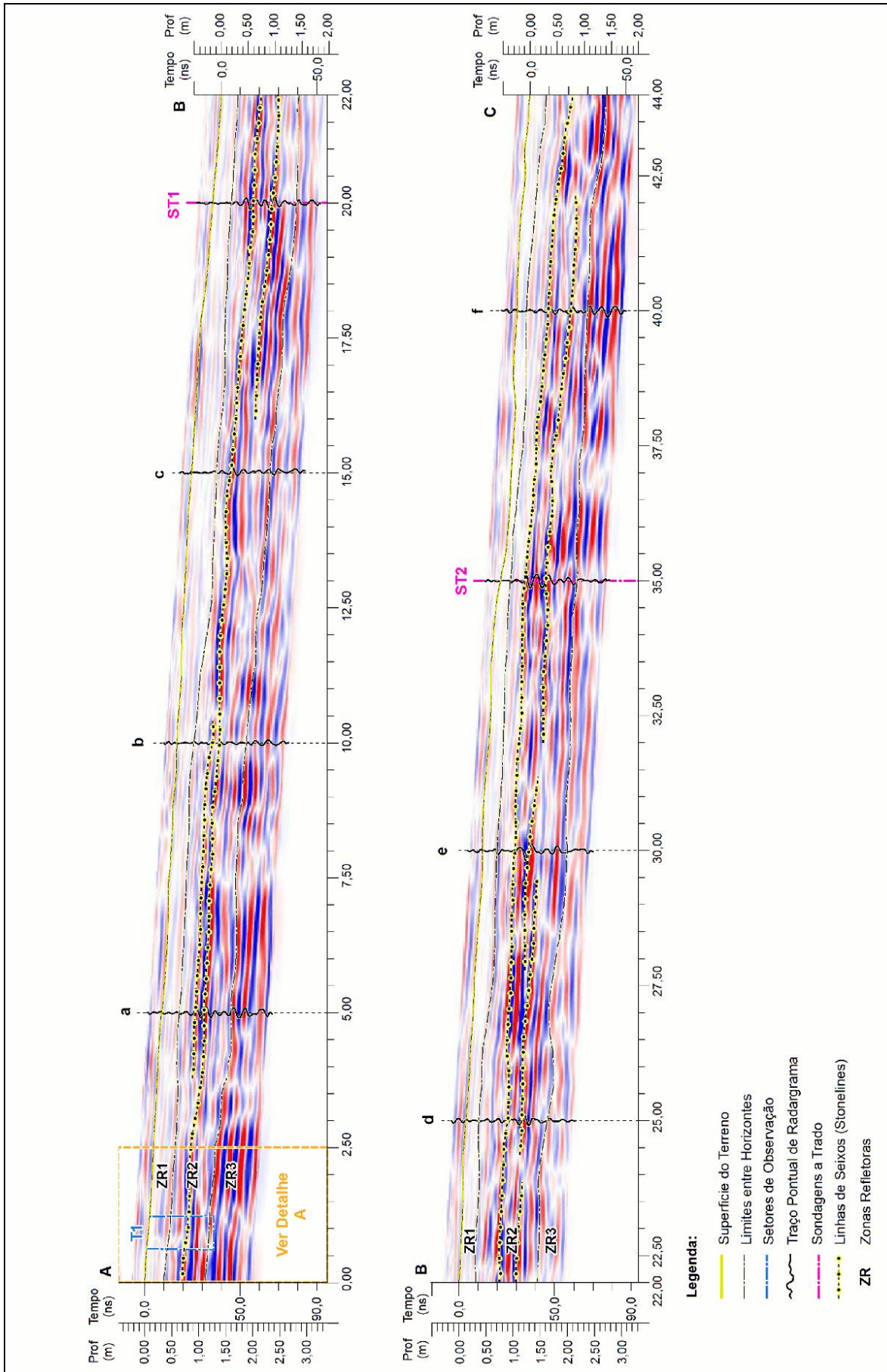


Figura 46 – Radargrama com a identificação das zonas refletoras em Cambissolo (Parte A).

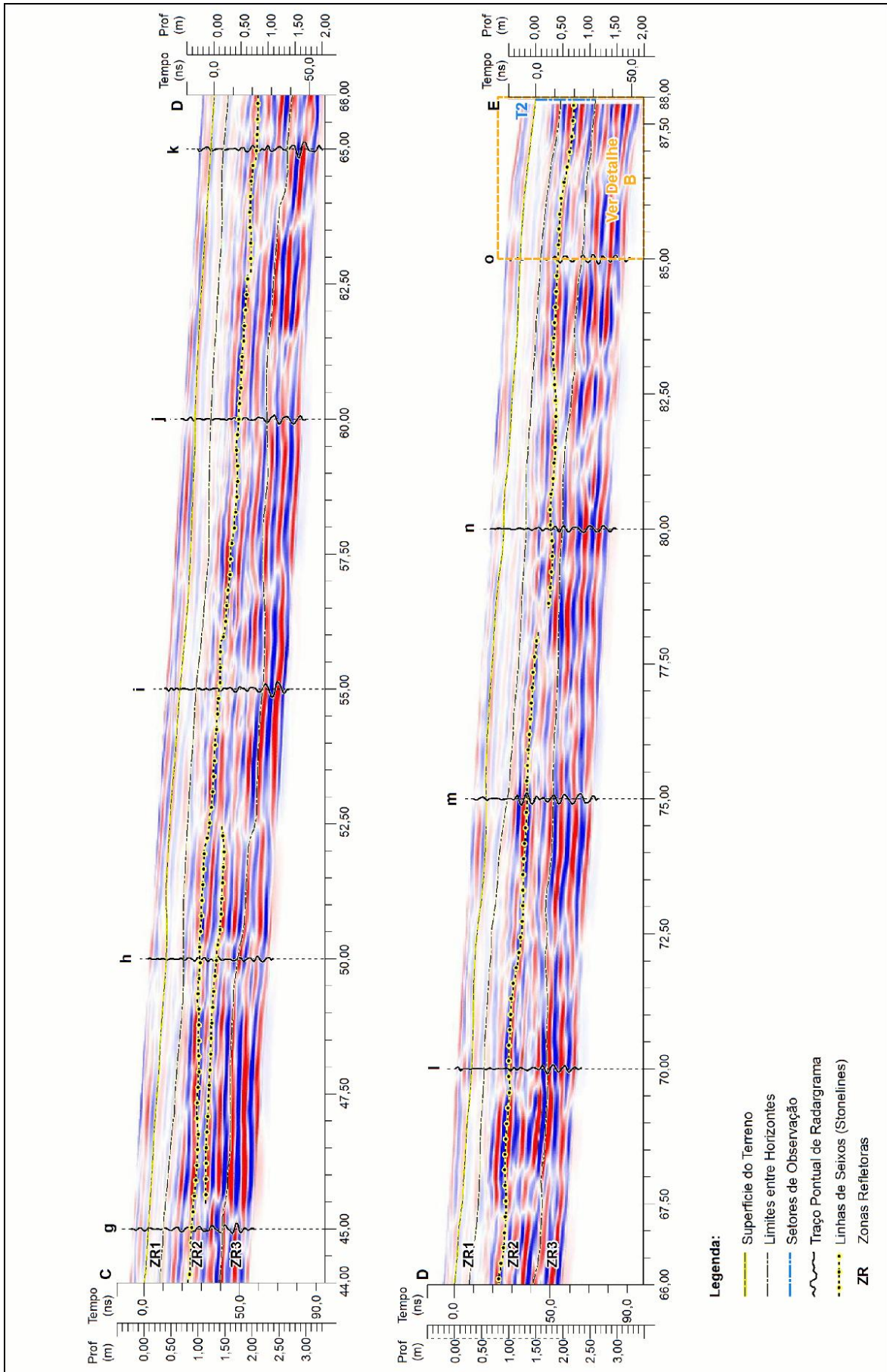


Figura 47 – Radargrama com a identificação das zonas refletoras em Cambissolo (Parte B).

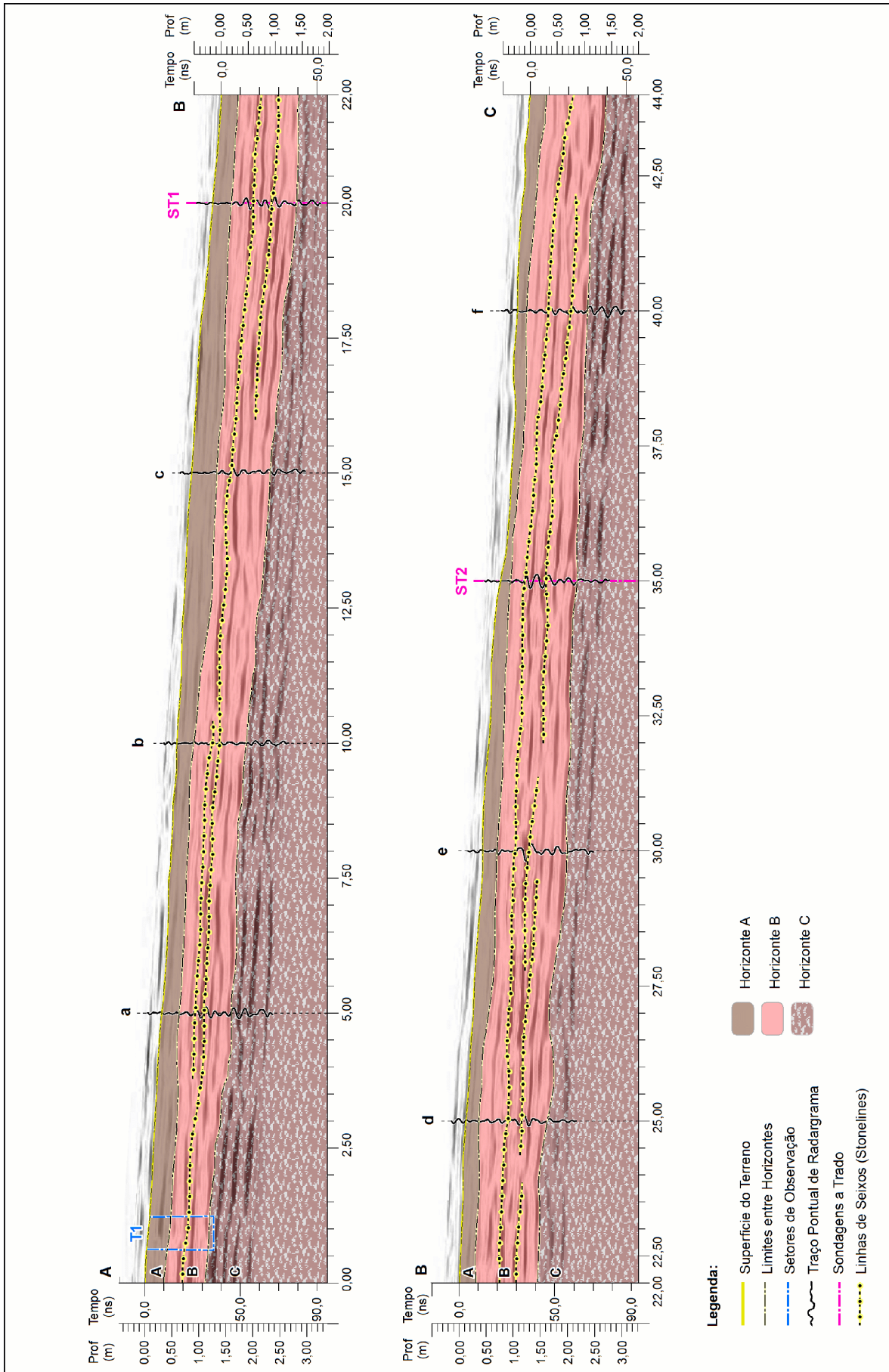


Figura 48 – Interpretação do radargrama e definição do perfil pedológico em Cambissolo (Parte A).

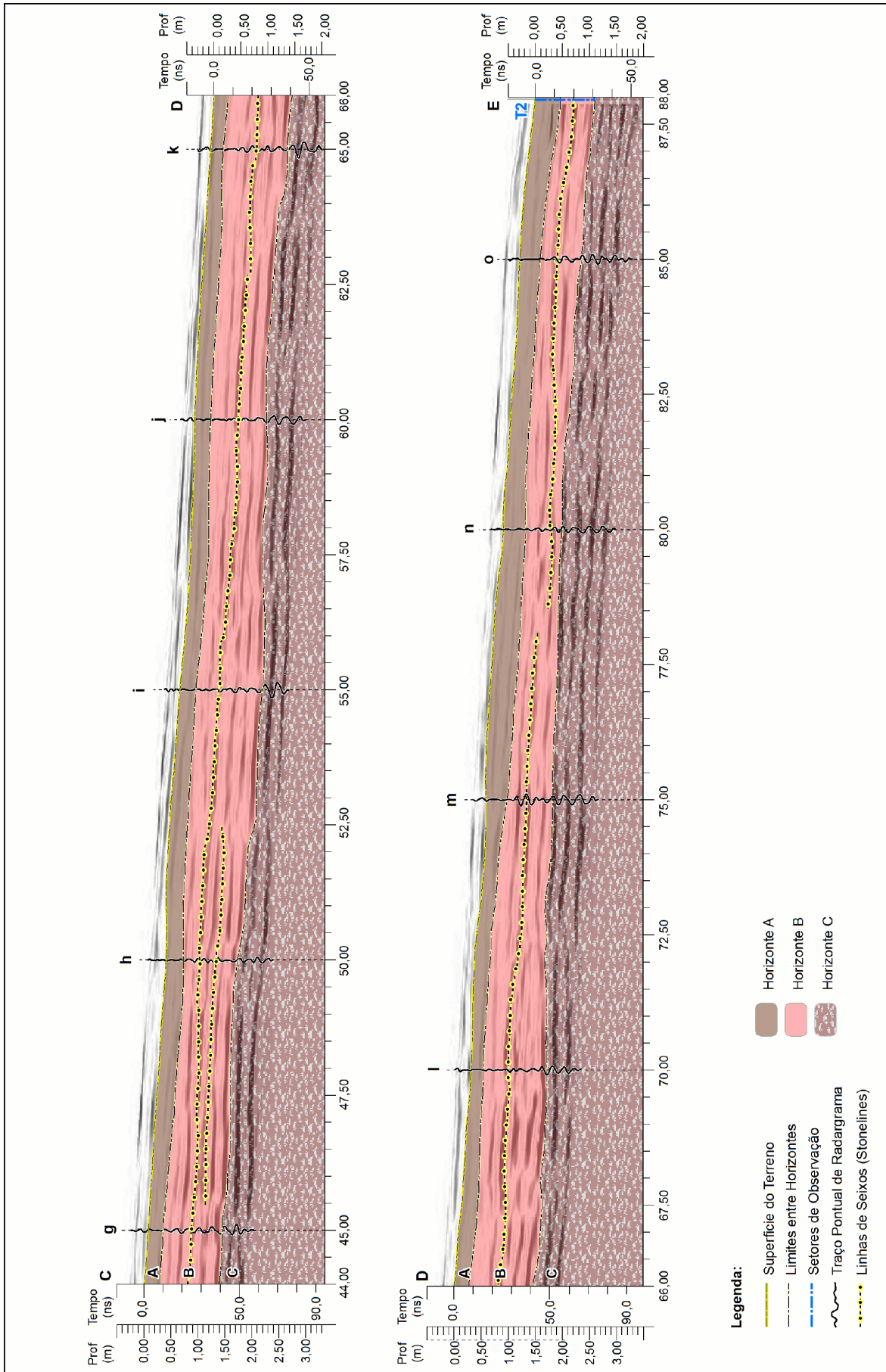


Figura 49 – Interpretação do radargrama e definição do perfil pedológico em Cambissolo (Parte B).

5.3. ARGISSOLOS

5.3.1. Caracterização da Área em Prospecção

O terceiro ponto de estudo adotado para este trabalho localiza-se na Fazenda Experimental de Iguatemi, propriedade da Universidade Estadual de Maringá (UEM). A fazenda possui 170,00 ha e está localizada no município de Maringá fazendo limites com o município de Mandaguaçu, com acesso principal pela rodovia BR-376, conforme demonstra a Figura 50.

A fazenda, segundo a MINEROPAR (2005), está inserida sobre o Grupo Bauru da Formação Caiuá, pertencente ao Cretáceo Médio, abrangendo os depósitos sedimentares continentais em que predominam os arenitos médios a finos, fazendo limites na porção superior com o Grupo São Bento da Formação Serra Geral, pertencente ao período de transição entre o Jurássico Superior e Cretáceo Inferior, com a ocorrência dos derrames basálticos.

De acordo com Santos *et al.* (2006), a área está localizada sobre a Bacia Sedimentar do Paraná na unidade morfoescultural do Terceiro Planalto Paranaense, especificamente na subunidade morfoescultural do Planalto de Maringá e com limites inferiores no Planalto de Campo Mourão.

Com relação aos solos, predominam os Argissolos Vermelhos, de constituição mineral e apresentando horizonte B textural (Bt), logo abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, excluindo o hístico, mas não apresentando características que os possam classificar como sendo Alissolos, Planossolos, Plintossolos ou mesmo Gleissolos (EMBRAPA, 2013).

As propriedades dos horizontes texturais dos Argissolos variam de arenosa à argilosa no horizonte A e entre média e muito argilosa no horizonte Bt devido ao incremento de argila em iluviação. Ainda, podem apresentar alguns requisitos, tais como a presença de horizontes plíntico ou glei, os quais não devem se encontrar acima ou em coincidência com a parte superficial do horizonte B textural.

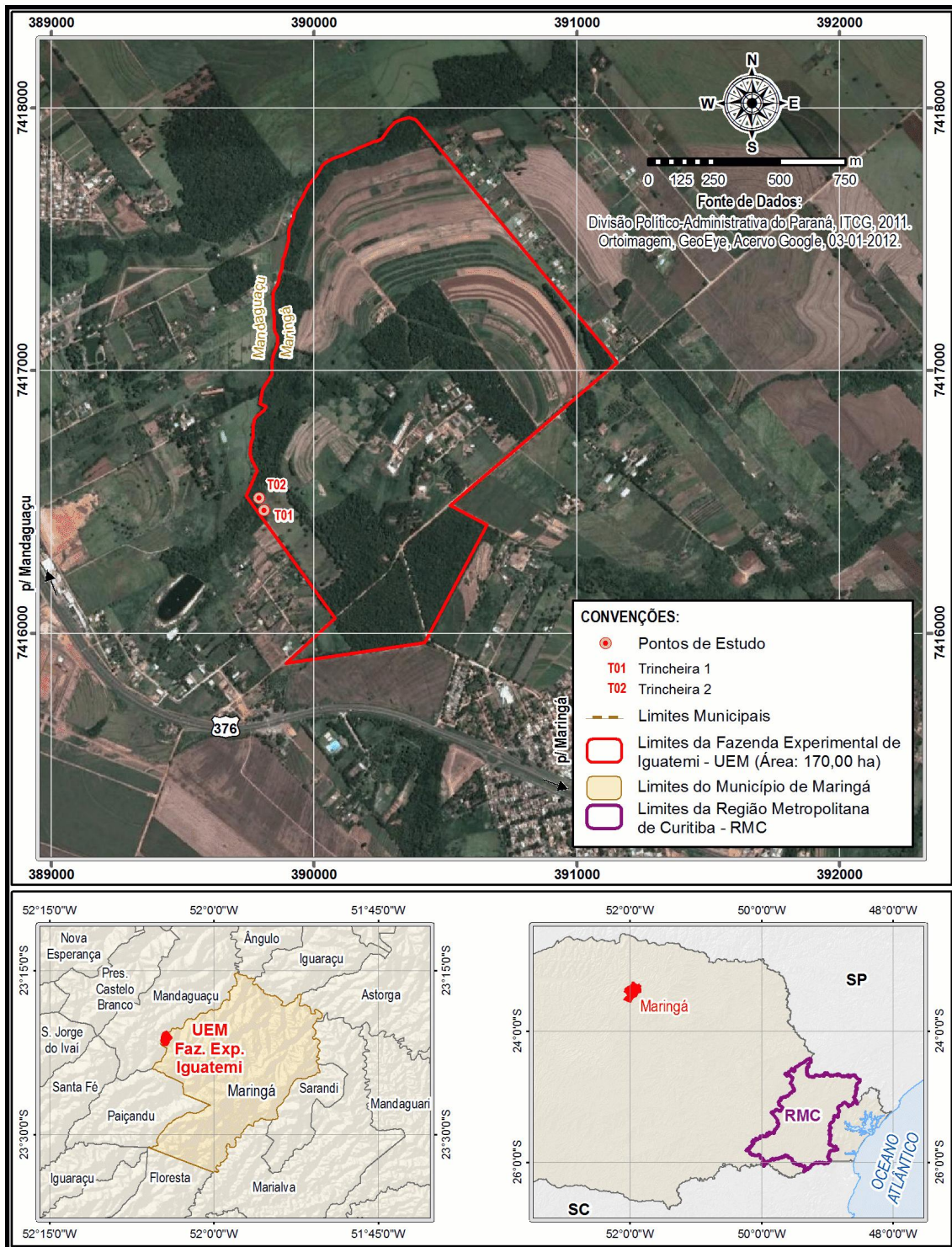


Figura 50 – Mapa de localização da Fazenda Iguatemi (UEM).
(Org. Orestes Jarentchuk Junior).

Outra classe de solos possível de ser encontrada na fazenda refere-se aos Latossolos Vermelhos, também de constituição mineral e caracterizados como solos bastante desenvolvidos, entendendo seu grau de intemperização bastante avançado e apresentando profundidades elevadas, com raros casos em que são inferiores a um metro. Conforme a EMBRAPA (2013), apresentam horizonte B latossólico (Bw) logo abaixo de quaisquer horizontes superficiais, excetuando o hístico.

O transecto de imageamento percorre uma extensão de 56,50 m, tendo seu início próximo a uma trincheira de observação de Argissolo (T1) passando por uma segunda trincheira (T2), distante a 47,50 m em relação à primeira e próxima ao Ribeirão Centenário (Figura 51), um curso d'água que não supera a 1,00 m de largura e que representa o contato geológico entre as unidades da Formação Caiuá e Grupo São Bento.



Figura 51 – Ribeirão Centenário, localizado abaixo da trilha de imageamento, logo após a trincheira T2.

A trincheira T2 apresenta volumes pedológicos hidromórficos com características glei. Ressalta-se que o imageamento não recobre a trincheira T1, porém a análise visual desse ponto foi importante para auxiliar na interpretação dos radargramas.

A área imageada apresenta-se bastante modificada (Figura 52a) com a supressão da vegetação nativa e atual uso para pastagem (Figura 52b), o que permitiu o carreamento de material do solo de montante à jusante na topossequência. Isso se reflete na caracterização da trincheira de observação T1, apresentando um horizonte superficial acima do textural identificado como sendo de

eluviação, estando ausente o horizonte superficial organo-mineral, mas com a formação de um horizonte A antropizado (Ap).

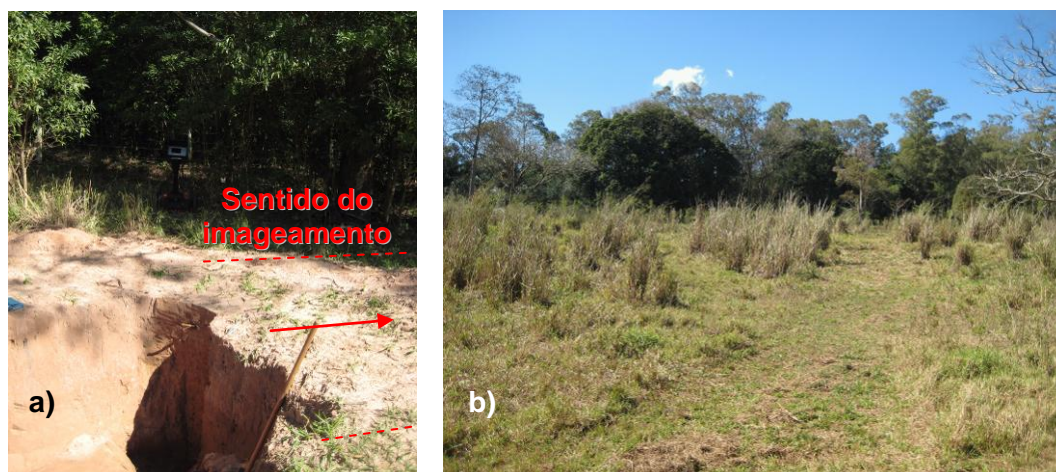


Figura 52 – a) Entorno da trincheira T1, demonstrando a situação atual da superfície com decapamento da vegetação e alteração do horizonte superficial. b) Situação atual da vegetação de entorno da trilha de imageamento. Observa-se a predominância de espécies gramíneas com uso do espaço para pastoreio.

5.3.2. Descrição dos Perfis Pedológicos

A trincheira T1, zona de observação posicionada logo acima do início do transecto de imageamento e localizada na porção mais elevada da vertente, permite a caracterização de quatro horizontes pedológicos distintos, indicados pela Figura 53 e descritos resumidamente pelo Quadro 22.

O horizonte Ap apresenta-se com espessura bastante reduzida, com apenas 5 cm, cor bruno-avermelhada (5YR 4/4) e textura arenosa. Um horizonte de eluviação (E), definido por uma mudança difusa na coloração do solo para vermelho-amarelado (5YR 4/6), é identificado com espessura de até 15 cm com presença nítida de grande quantidade de areia.

Em sucessão, um horizonte B textural (Bt) em transição abrupta, com aumento expressivo na quantidade de argila em relação ao horizonte superior e apresentando coloração vermelho-amarelada (5YR 5/6), com textura argilosa e indicando cimentação extrema, apresenta também sinais de mosqueamento refletindo certo grau de hidromorfismo e oxi-redução em seus limites inferiores.

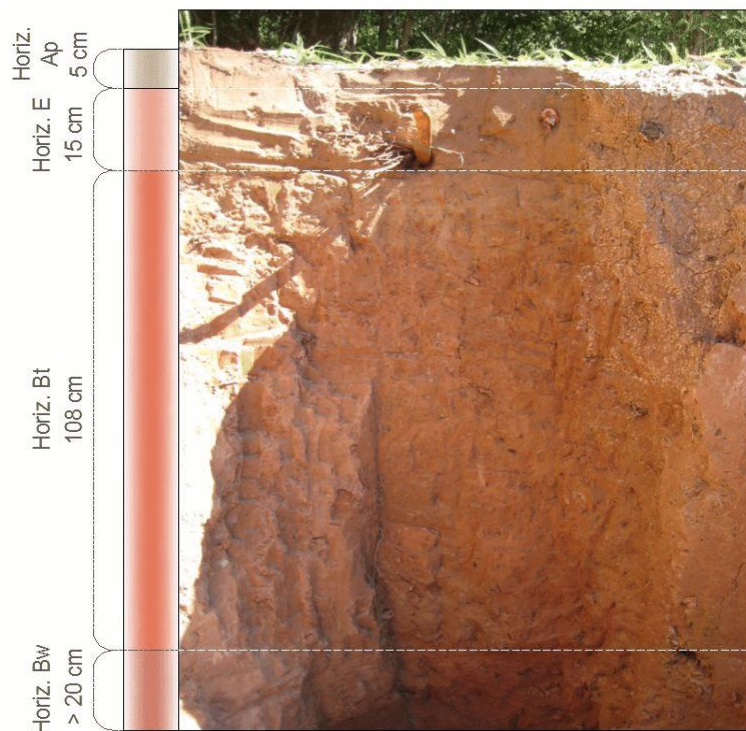


Figura 53 – Perfil pedológico da trincheira T1 (Argissolo Vermelho-Amarelo).

Horizonte	Prof. (m)	Cor (Munsell)	Textura	Cimentação
Ap	0 a 0,05	5YR 4/4 Bruno-avermelhado	Arenosa	-
E	0,05 a 0,20	5YR 4/6 Vermelho-amarelado	Arenosa	-
Bt	0,20 a 1,28	5YR 5/6 Vermelho-amarelado	Argilosa	Extrema
Bw	> 1,28	2,5YR 4/6 Vermelho	Média	-

Quadro 22 – Descrição dos horizontes pedológicos da trincheira T1.

Outro horizonte B é identificado a partir de 128 cm de profundidade, logo abaixo do horizonte Bt, em coloração vermelha (2,5YR 4/6), mantendo a textura média, porém perdendo o grau de cimentação observado no volume superior. Considerando que há predominância de Latossolos em porções mais elevadas da fazenda trazendo a hipótese de que os Argissolos dessa região tiveram sua gênese ligada à transformação de Latossolos, com processos de eluviação e cimentação do horizonte B, este horizonte é definido então como sendo um horizonte B latossólico (Bw).

As cores predominantes de seus horizontes permitem classificar o solo nesse setor da topossequência conforme o 2º nível categórico, sendo pertencente à subordem dos Argissolos Vermelho-Amarelos.

Em relação à trincheira T2, zona de observação posicionada na porção menos elevada da vertente, próxima ao curso d'água Ribeirão Centenário, é possível caracterizar cinco diferentes horizontes pedológicos, como bem ilustra a Figura 54 e descreve em resumo o Quadro 23.

O horizonte Ap apresenta-se agora com pelo menos 15 cm de espessura e mantém sua coloração em relação à trincheira T1 como bruno (7,5YR 5/4) e a textura arenosa. Permanece um horizonte de caráter eluvial (E), com textura arenosa e mudança na coloração do solo para vermelho (2,5YR 5/6), ocupando um volume pedológico com espessura de até 30.

Logo abaixo, um horizonte de coloração vermelha (2,5YR 4/8) com incremento abrupto de argila, ainda que apresente textura média, é definido como sendo B textural (Bt) e possui um grau de cimentação fraco alcançando espessura de 44 cm.

Visto que há predominância de cores vermelhas nos horizontes desse setor da topossequência, pode-se classificar o solo conforme o 2º nível categórico, sendo pertencente à subordem dos Argissolos Vermelhos. Portanto, trata-se da ocorrência de uma transição entre Argissolos Vermelho-Amarelos e Argissolos Vermelhos no local.

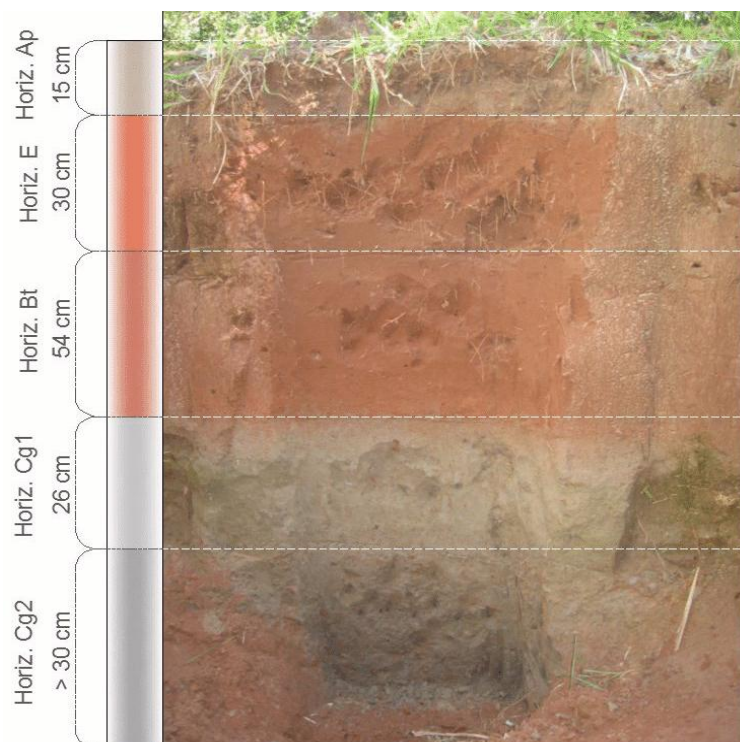


Figura 54 – Perfil pedológico esquemático e comportamento de propagação das ondas eletromagnéticas entre os horizontes da trincheira T2 (Argissolo Vermelho).

Horizonte	Prof. (m)	Cor (Munsell)	Textura	Cimentação
Ap	0 a 0,15	7,5YR 5/4 bruno	Arenosa	-
E	0,15 a 0,45	2,5YR 5/6 vermelho	Arenosa	-
Bt	0,45 a 0,99	2,5YR 4/8 vermelho	Média	Fraca
Cg1	0,99 a 1,25	10YR 5/2 bruno-acinzentado	Arenosa	-
Cg2	> 1,25	10YR 4/2 bruno-acinzentado escuro com mosqueamentos vermelho-amarelados	Média	-

Quadro 23 – Descrição dos horizontes pedológicos da zona de observação “T1”.

Foi possível identificar horizontes que nitidamente passaram por processos de hidromorfismo, sendo caracterizados nessa porção da vertente como horizontes glei, subdivididos em função da mudança textural e coloração.

Assim, um horizonte glei (Cg1) é reconhecido com textura arenosa e espessura de 26 cm com coloração bruno-acinzentada (10YR 5/2). Um segundo horizonte glei (Cg2) é identificado na sequência a partir de 125 cm de profundidade, caracterizado por uma mudança em sua textura (média) e coloração para bruno-acinzentado escuro (10YR 4/2), com a presença de pouco mosqueamento (até 2%) e pequeno (até 5 mm), em coloração mais intensa, em tons vermelho-amarelados.

Ainda que sejam reconhecidos os horizontes glei nesse setor da topossequência, no conjunto não há respeito aos critérios que o enquadrariam como Gleissolo, como por exemplo a necessidade de não apresentar horizonte B diagnóstico de qualquer tipo acima do horizonte glei.

5.3.3. Interpretação dos Perfis em Radargramas


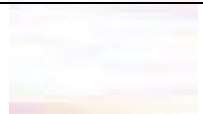



Considerando as duas zonas de observação (trincheiras T1 e T2) para o transecto de imageamento, procurou-se reconhecer os mesmos volumes pedológicos nos radargramas obtidos.

Foram definidos sete distintos padrões de refletores, os quais representam os horizontes identificados em campo, assim como horizontes inferidos. De forma resumida, os quadros Quadro 24 e Quadro 25 apresentam a identificação das zonas refletoras auxiliada pela observação dos traços pontuais de radargrama (“a” a “u”). Estes elementos que representam as mudanças de fase das ondas eletromagnéticas em seu percurso através de diferentes meios em subsuperfície estão indicados nos perfis da Figura 56 a Figura 58. De maneira a ilustrar as zonas refletoras reconhecidas para as trincheiras T1 e T2, a Figura 55 traz um recorte do radargrama nas posições em que se encontram na topossequência.







A zona refletora ZR1, constante ao longo de todo o transecto, delimita o horizonte Ap, com espessura entre 0,10 m e 0,15 m, e seu limite inferior está entre 2,1 ns e 2,9 ns. Seus refletores apresentam composição paralela e contínua, porém com intensidades baixas.

A zona refletora correspondente ao horizonte E (ZR2) é demarcada com o auxílio da observação nas mudanças de fase das ondas eletromagnéticas, para as quais os traços pontuais de radargrama apresentam sutis alterações nas amplitudes dos refletores em comparação com o horizonte Ap. Também ocorrem variações significativas nas amplitudes de onda que percorrem o horizonte que o sucede (Bt), decorrente do incremento de argila no horizonte inferior, comprovado pela transição abrupta na textura do solo.

Os refletores reconhecidos para a ZR2 apresentam-se com menor intensidade e suas configurações de reflexão descrevem disposições subparalelas e continuidades moderadas.

Zonas Refletoras		Horizontes	Espessuras (m)	Tempo (ns)
ZR1		Ap	0,10	0 a 2,1
ZR2		E	0,40	2,1 a 11,9
ZR3		Bt	0,95	11,9 a 33,9
ZR4		Bw	0,55	33,9 a 46,8
ZR5		C	> 0,60	46,8 a 60,0
		Velocidade Média (m/ns)		0,09026
		Constante Dielétrica (k)		11

Quadro 24 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodossolos.

Zonas Refletoras		Horizontes	Espessuras (m)	Tempo (ns)
ZR1		Ap	0,15	0 a 2,9
ZR2		E	0,35	2,9 a 10,1
ZR3		Bt	0,45	10,1 a 21,2
ZR6		Cg1	0,30	21,2 a 26,0
ZR7		Cg2	0,60	26,0 a 40,0
ZR5		C	> 0,70	40,0 a 60,0
Velocidade Média (m/ns)				0,09026
Constante Dielétrica (k)				11

Quadro 25 – Representação dos principais padrões de fácies de radar definidas para os horizontes pedológicos a partir do radargrama obtido em Espodossolos.

Em relação à zona refletora ZR3, correspondente ao horizonte B textural (Bt), observam-se ampliações nos picos do traço pontual de radargrama citadas anteriormente, referindo-se à mudança abrupta das propriedades entre os meios, notoriamente com o incremento de argila. Seu limite com a ZR2 é identificado entre 11,9 ns e 10,1 ns, em profundidade média de 0,50 m. Os refletores estão dispostos de maneira subparalela e em continuidades moderadas.

No que diz respeito à zona refletora ZR4, tem-se a representação do horizonte B latossólico (Bw), novamente indicando mudanças nas amplitudes do traço pontual de radargrama, porém com fortalecimento de continuidades entre os refletores. De maneira geral, seus refletores se apresentam de forma semelhante àqueles que compõem a ZR3, e sua espessura média é de 0,55 m, com limites superior e inferior entre 33,9 ns e 46,8 ns.

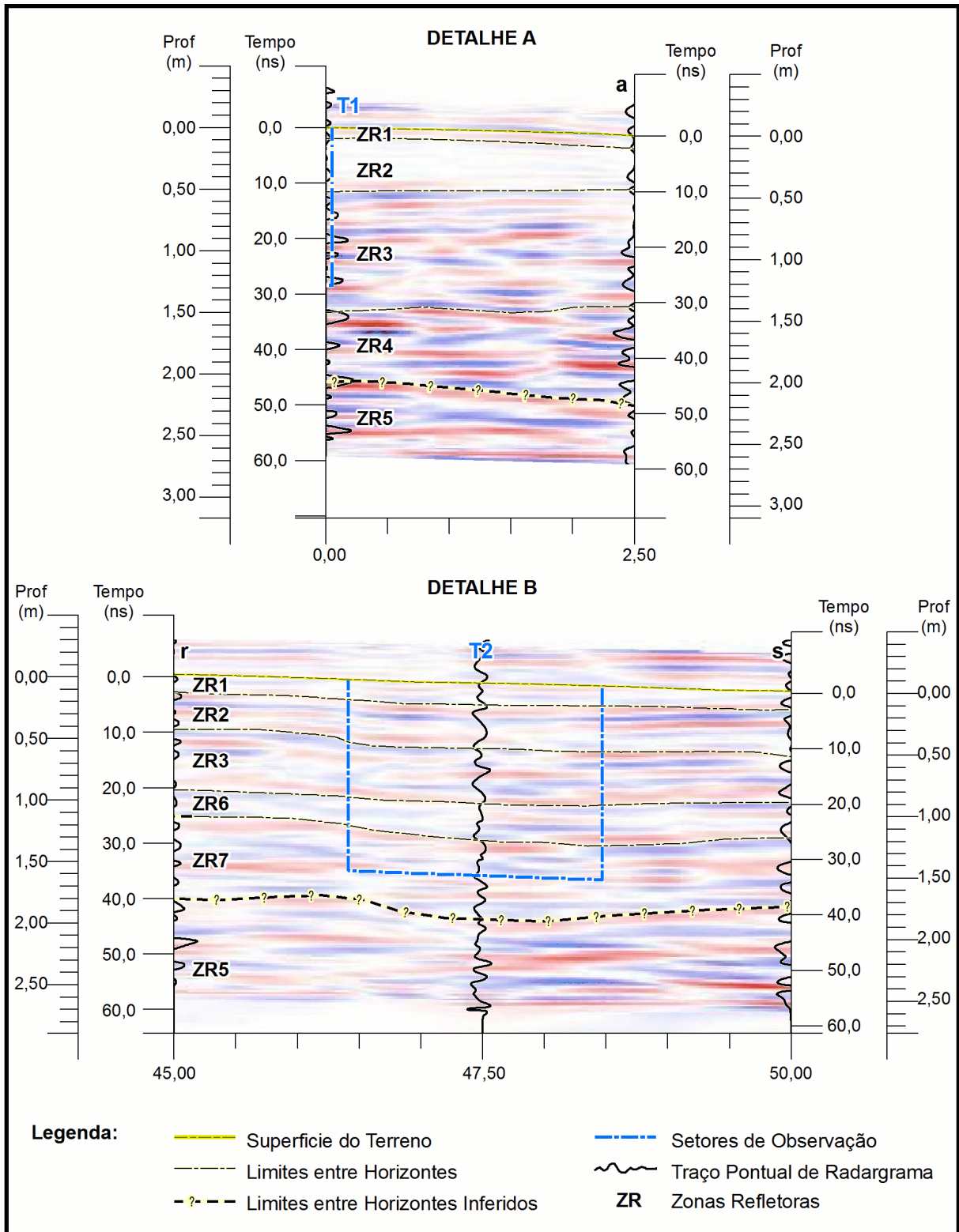


Figura 55 – Identificação das zonas refletoras sobre o radargrama para as posições das trincheiras T1 (detalhe A) e T2 (detalhe B).

É possível demarcar dois volumes que correspondem aos horizontes glei Cg1 e Cg2, como aqueles reconhecidos em campo a partir da zona de observação na trincheira T2, os quais variam em termos intensidade de refletores e amplitudes de onda à medida que se tem mudança na textura dos horizontes em profundidade.

A zona refletora ZR5, relacionada ao horizonte C, tem seu limite superior entre 1,85 m e 2,00 m, cerca de 40,0 ns e 46,8 ns. Seus refletores apresentam intensidades moderadas a fortes e configurações subparalelas em continuidades moderadas.

Os horizontes que apresentam avançado grau de hidromorfismo e que se encontram acima do horizonte C e logo abaixo do Horizonte Bt, são identificados pelas zonas refletoras ZR6 e ZR7. A zona refletora correspondente ao horizonte Cg1 (ZR6) é identificada com o auxílio da observação nas mudanças de fase das ondas eletromagnéticas, para as quais os traços pontuais de radargrama (“r” a “s” e T2) apresentam visíveis alterações nas amplitudes de onda em comparação com o horizonte Bt.

O limite da ZR6 com o horizonte sobrejacente (ZR3) tem profundidade média de 0,95 m e se encontra a 21,2 ns. As configurações de reflexão representam comportamento subparalelo e moderadamente contínuo com refletores de baixa intensidade. Por sua vez, para a zona de reflexão ZR7, representando o horizonte Cg2, em profundidade média de 1,25 m a 26 ns, as configurações de reflexão caracterizam também disposições subparalelas em continuidades moderadas.

A velocidade média de propagação das ondas eletromagnéticas para o solo imageado foi de 0,09026 m/ns, enquanto que a constante dielétrica definida para o Argissolo com horizontes glei é dada pelo valor igual a 11, em concordância com os valores atribuídos para solos argilosos saturados (10 a 20) e solos muito argilosos saturados (10 a 15), de acordo com estudo elaborado por Cassidy (2009).

Os resultados da aplicação do Georradar na prospecção eletromagnética em Argissolos indica a baixa potencialidade de uso do equipamento para essa classe de solos, pois o condicionamento das intensidades dos refletores é função do acréscimo de argila em profundidade.

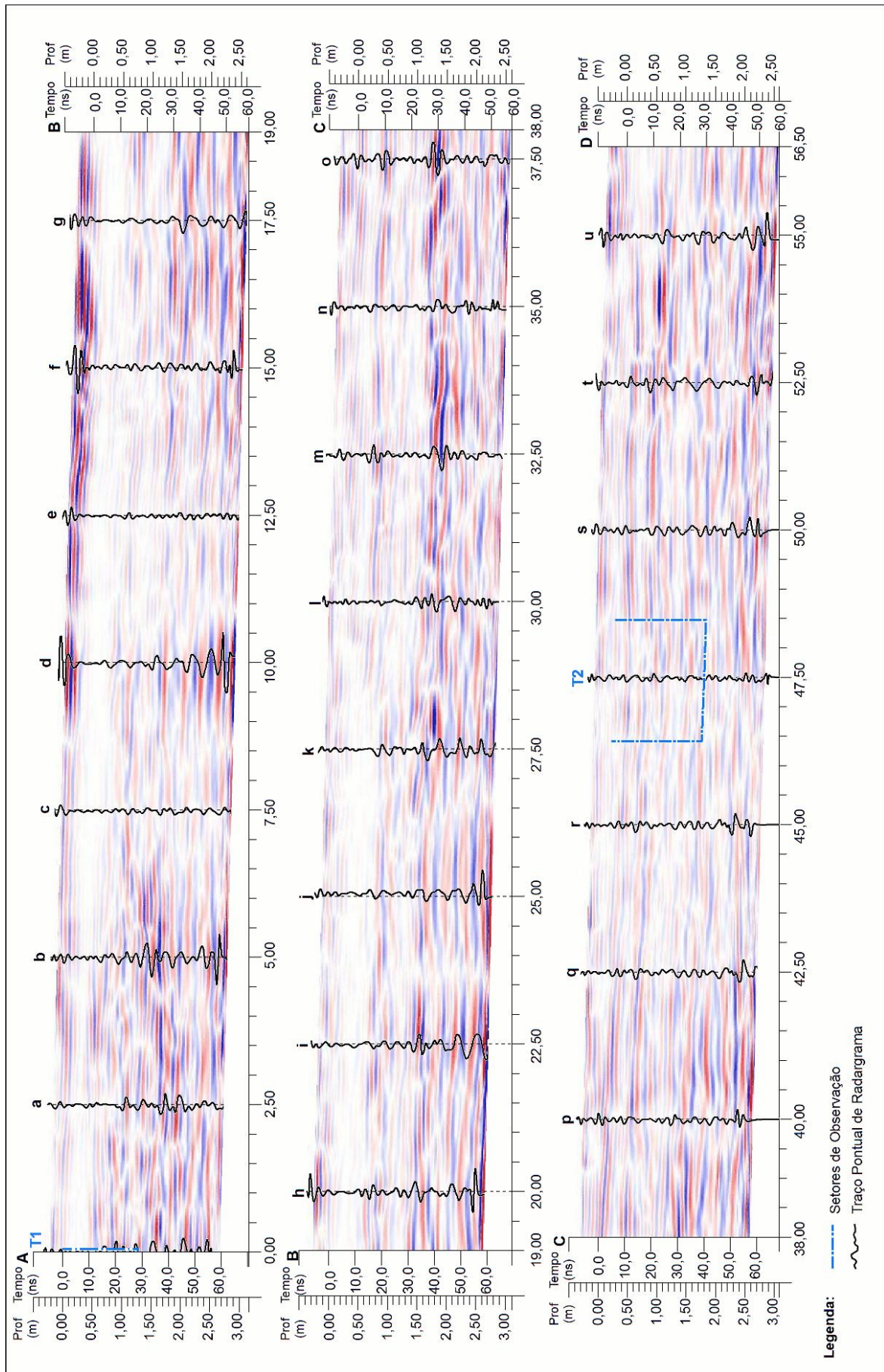


Figura 56 – Radargrama processado com indicação dos traços pontuais.

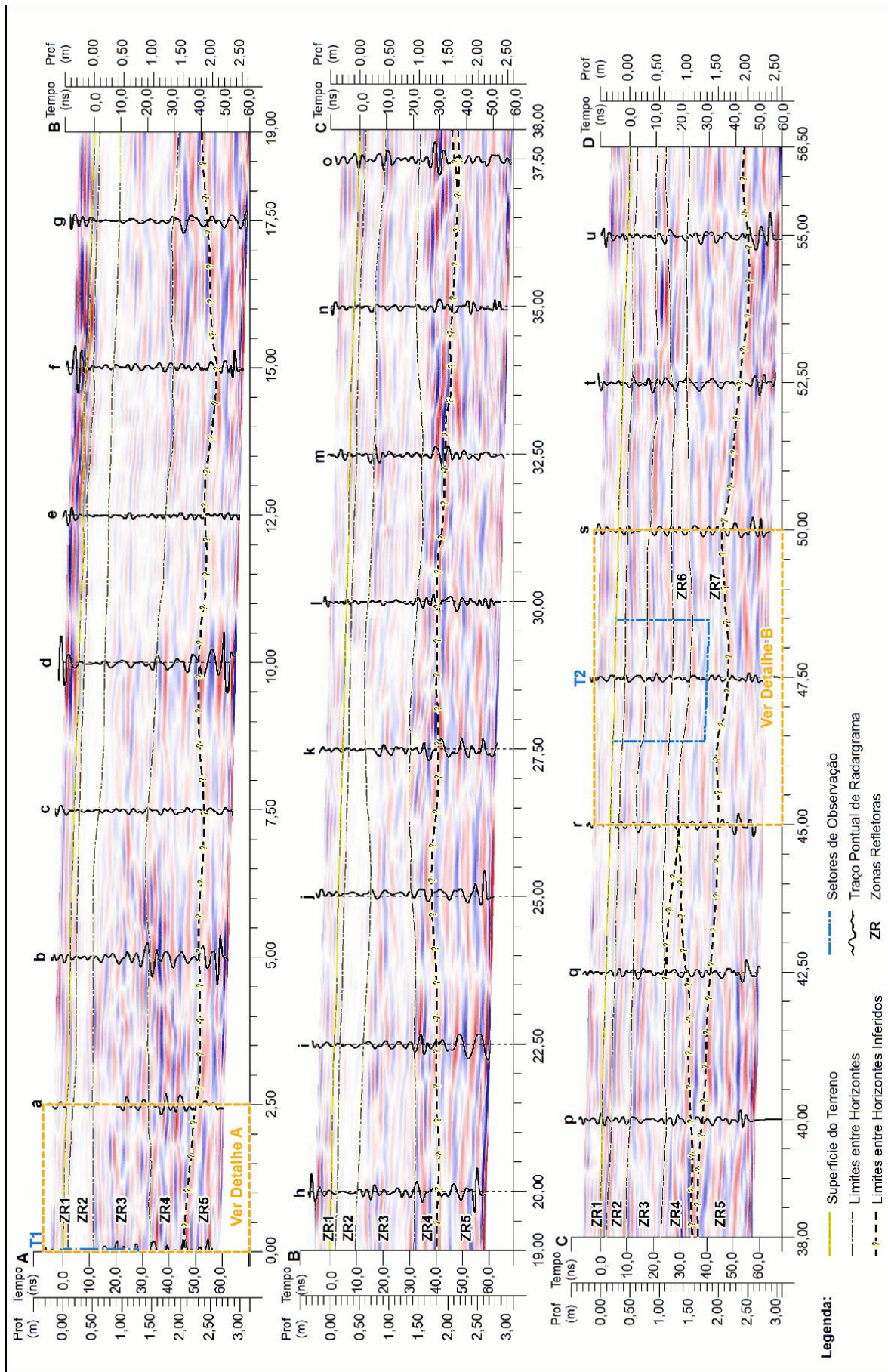


Figura 57 – Radargrama com a identificação das zonas refletoras em Argissolos.

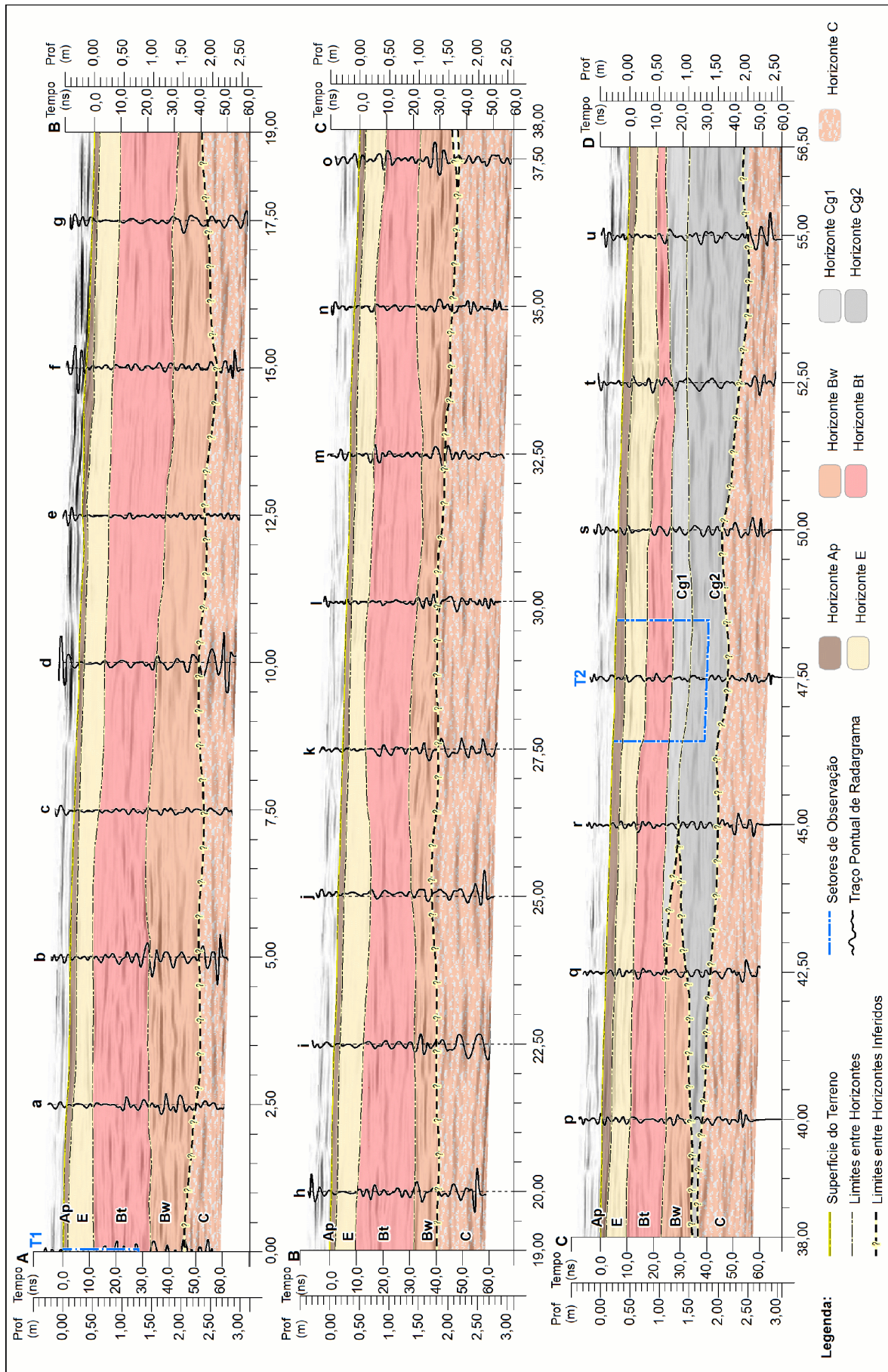


Figura 58 – Interpretação do radargrama e definição do perfil pedológico em Argissoles.

6. POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DA APLICAÇÃO DO GEORRADAR NA PROSPECÇÃO ELETROMAGNÉTICA DOS SOLOS APRESENTADOS

As potencialidades e limitações do Georradar foram avaliadas em consideração aos transectos de imageamento presentes neste estudo, traduzindo as vantagens e problemas encontrados durante a operação do equipamento e tratamento dos dados, frente às respostas de propagação das ondas eletromagnéticas em relação às propriedades físico-químicas dos solos imageados, sobretudo as diferenças texturais.

6.1. POTENCIALIDADES

A técnica de prospecção eletromagnética que este estudo apresentou, através do emprego de uma antena com frequência central de operação de 270 MHz, forneceu imagens de resolução satisfatória para o reconhecimento de horizontes pedológicos numa profundidade aproximada de até 3m.

O Georradar se mostrou uma ferramenta útil para o reconhecimento da geometria dos horizontes pedológicos de algumas classes de solos selecionadas para o trabalho, permitindo a determinação de suas continuidades laterais com relativa acurácia.

A mudança ora gradativa e ora abrupta do comportamento das ondas eletromagnéticas em profundidade, observada através da identificação de mudanças de fase das ondas e das distintas intensidades em que se apresentaram os refletores, permitiu o reconhecimento da mudança na condutividade elétrica dos diferentes horizontes pedológicos.

Tal situação é decorrente da atenuação do sinal muito em função do incremento de argila nos horizontes inferiores, conforme observado na caracterização textural dos mesmos, a exemplo do que ocorre entre os horizontes A e B dos Cambissolos. Outra situação refere-se ao acúmulo de matéria orgânica, como foi o caso para os horizontes espódicos dos Espodossolos. Nesse sentido, as

diferenças entre as amplitudes dos refletores de um horizonte para outro permitiram o reconhecimento dos horizontes pedológicos.

Prospecções sequenciais em disposição paralela se associadas permitiriam a construção de um modelo tridimensional dos volumes pedológicos, contribuindo significativamente para mapeamentos de solos em escalas de detalhe ou até mesmo ultradetalhados (conforme os níveis de detalhamento propostos pelo IBGE, 2007).

A delimitação tridimensional dos volumes pedológicos de determinada área pode auxiliar em trabalhos de planejamento de implantação de empreendimentos, seja para reconhecer as continuidades laterais e verticais de horizontes de solos para obras de engenharia civil, assim como para áreas de interesse agrícola, associando a outros estudos e técnicas que tragam informações sobre fertilidade e teores de umidade.

Outra finalidade para a construção de um modelo tridimensional de solos pode estar na contribuição ao entendimento da pedogênese de solos em planícies costeiras, por exemplo, a partir da identificação dos limites de transição dos tipos de solos conforme a mudança da formação vegetal predominante.

Uma hipótese é de que a evolução dos Neossolos Quartzarênicos para Espodossolos Humilúvicos, como demonstra a Figura 59, ocorre à medida que a vegetação se estabiliza a partir de espécies pioneiras de influência marinha até espécies florestais de terras baixas. Isto ocorre em função da disponibilidade de nutrientes e matéria orgânica em subsuperfície conforme avança para o continente e um transecto utilizando o Georradar poderia adicionar informações acerca das continuidades laterais desses solos em pedossequência.

Poderiam também ser discutidas com maior detalhe as relações entre os Argissolos e Latossolos do Noroeste paranaense, assim como dos processos de hidromorfismo em horizontes minerais, como o processo que ocorre no Argissolo apresentado neste trabalho.

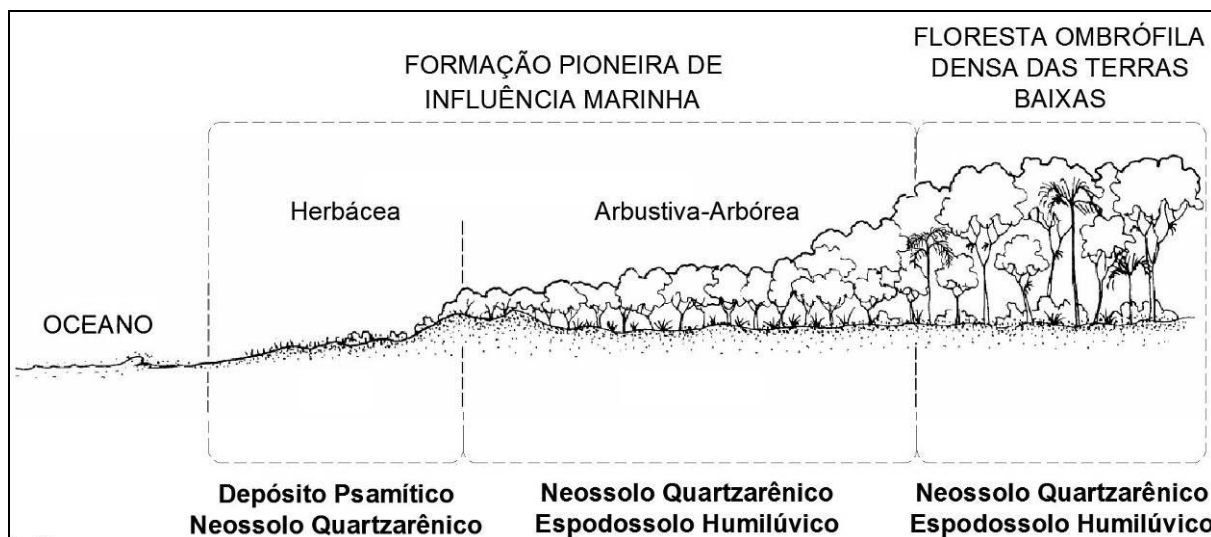


Figura 59 – Perfil Representativo da Planície Costeira Paranaense (adaptado de Galvão *et. al.* [s.d.]).

6.2. LIMITAÇÕES

Percebeu-se que a aplicação do equipamento em estudos pedológicos com a proposição de construção de perfis em topossequências, no entanto, não permitiu o reconhecimento de horizontes de transição, os quais apresentam sutis alterações muito mais visuais do que em suas propriedades texturais, sendo então negligenciadas pelas respostas fornecidas pelo Georradar.

Os horizontes que apresentam sutis diferenças em suas propriedades texturais, e que por isso não foram distinguidos em radargramas, referem-se aos horizontes A e E de Espodossolos, os quais foram agrupados em uma mesma zona refletora de radar muito em função da similaridade de suas capacidades de condução elétrica, e aos horizontes A/B dos Cambissolos, os quais tiveram sua espessura dividida entre os horizontes A e B, segundo a gradiente textural.

Contudo, a ausência na identificação dos horizontes de transição não desqualificou a aplicação do Georradar na delimitação de volumes pedológicos sobre os radargramas, ao contrário, permitiu a definição com maior precisão entre os horizontes desconsiderando a análise visual por cor, reduzindo a subjetividade no processo de caracterização das geometrias das camadas para o intérprete.

Também, propriedades físicas de determinados tipos de solos podem inviabilizar a utilização do Georradar, a exemplo do que ocorre nos Argissolos, onde o teor de argila existente nos horizontes impediu a discriminação dos horizontes pedológicos com eficácia.

Por fim, cabe ressaltar que em termos de logística, a operação do equipamento por vezes se torna desconfortável em função de problemas de acesso à área de estudo, dificultando seu transporte e necessitando ainda da limpeza prévia da superfície de imageamento, limitando seu uso principalmente a áreas que se apresentem cobertura vegetal de pouca densidade.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a construção desta pesquisa e alcance dos objetivos propostos preocupou-se com a compreensão dos princípios de funcionamento do equipamento Georradar para a aplicação em prospecções eletromagnéticas de solos.

Reconhece-se, no entanto, a necessidade de aprofundamento sobre a aplicabilidade do método geofísico descrito para a prospecção de outros diferentes tipos de solos, assim como da discussão sobre as relações pedogenéticas dos mesmos a fim de se aprimorar e enriquecer o conhecimento acerca dos objetivos pré-determinados.

A pesquisa obteve resultados que satisfizeram aos objetivos propostos e permitem tecer algumas notas a respeito do emprego do Georradar no reconhecimento da geometria dos volumes pedológicos dos solos imageados.

Em estudos pedológicos, a incidência de altos teores de argila e mesmo de umidade nem sempre serão limitações para a aplicação do Georradar assim como o é para estudos geológicos e de outras áreas que se utilizam da prospecção eletromagnética. Referem-se a elementos importantes para o reconhecimento do material em subsuperfície, já que condicionam o comportamento das ondas eletromagnéticas em profundidade, demonstrando as diferenças nas permissividades dielétricas dos materiais constituintes de diferentes tipos de solos.

Nesse sentido, o teor de argila condicionou diretamente os valores das constantes dielétricas encontradas, calculadas em função da determinação da velocidade média de propagação das ondas eletromagnéticas nos solos em estudo, sendo esses valores comparáveis àqueles atribuídos em pesquisa desenvolvida por Cassidy (2009), e refletindo a natureza do material em subsuperfície como expõe o Quadro 26.

A intensidade dos refletores é claramente influenciada pelo incremento de matéria orgânica, argila e umidade nos solos estudados. Observou-se que a constante dielétrica encontrada para os Cambissolos supera o valor encontrado para os Argissolos, e os próprios intervalos propostos por Cassidy (2009) acusam essa diferença, em que os solos argilosos e saturados podem apresentar constante dielétrica com valor até 20, enquanto solos muito argilosos e saturados têm como valor máximo igual a 15.

Classe de Solos	Constante Dielétrica de Aquisição	Constante Dielétrica Calculada	Constante Dielétrica segundo Cassidy (2009)
Espodossolos	12	5,1	4 a 6 (solos arenosos secos)
Cambissolos	12	17,5	10 a 20 (solos argilosos saturados)
Argissolos	12	11	10 a 15 (solos muito argilosos saturados)

Quadro 26 – Constantes dielétricas de aquisição e calculadas.

Tais valores podem estar associados às diferenças nas atividades coloidais destes tipos de solos, lembrando que em Cambissolos, caracterizados como solos pouco desenvolvidos e intemperizados, predominam os argilominerais com retículo 2:1, portanto apresentam argila de atividade alta (Ta), enquanto que os Argissolos apresentam argila de atividade baixa (Tb) já que possuem argilominerais com retículo 1:1 (EMBRAPA, 2013).

Trabalhos adicionais de levantamentos topográficos seriam ideais para a melhor conformação das superfícies de terreno imageadas, assim como a construção de uma malha de perfis paralelos a fim de se obter o que poderíamos denominar de modelo pedológico digital (MPD) com a representação tridimensional e quantificação dos volumes pedológicos.

De maneira geral, podemos considerar que a integração entre esta técnica geofísica (Georradar) e a técnica convencional de prospecção de solos se mostrou relativamente eficiente para o melhor reconhecimento e determinação das geometrias e continuidades laterais dos horizontes pedológicos.

A aplicação dessa ferramenta permite a redução significativa da inferência das continuidades laterais dos solos. Contudo, é preciso entender que as propriedades físicas de determinados tipos de solos, bem como sua influência no comportamento das ondas eletromagnéticas em subsuperfície, podem tornar a prospecção eletromagnética inadequada. Pois a condutividade elétrica dos materiais constituintes dos solos interfere diretamente na qualidade do sinal e profundidade de imageamento.

Assim, a adição de informações provenientes de análises laboratoriais permitiria a melhor compreensão do comportamento e propagação das ondas eletromagnéticas em subsuperfícies considerando as propriedades físico-químicas que determinam a condutividade elétrica nos solos.

Em resumo, os resultados demonstram a potencialidade do Georradar em aplicação nos estudos pedológicos, ratificando informações expostas nos capítulos anteriores. Entretanto, a utilização de ferramentas convencionais e caracterização dos solos de forma tradicional, como a observação de perfis em trincheiras e a execução de sondagens diretas ao longo do transecto de imageamento, se faz necessária para a construção de um perfil pedológico detalhado, sendo a sua precisão dependente do nível de informações coletadas em campo.

Ainda, a correta configuração do equipamento em campo é tão importante quanto o procedimento de pós-processamento adotado, a fim de se obter a qualidade dos dados desde o início dos trabalhos de prospecção. A aplicação do Georradar em estudos do solo, portanto, não substitui as técnicas convencionais, nem mesmo reduz significativamente o tempo de trabalho em campo para a melhor caracterização geométrica dos solos alvos e exige experiência do usuário tanto na operação do equipamento quanto no objetivo de sua aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMPARO, N. S. **Utilização do radar como método não intrusivo para a realização de medidas de conteúdo de água na zona vadosa.** 2006. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana), Escola Politécnica, UFBA, Salvador, 2006.

ANNAN, A. P. **Practical processing of GPR data.** Sensors & Software, Inc, 1999. 18 p. Internal Report. Disponível em: <http://www.ees.nmt.edu/outside/courses/Geop446/Docs/GPR_data_process.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2011.

ANNAN, A. P. **Ground penetrating radar workshop notes.** Sensors & Software, Inc, 2001. 192 p. Internal Report. Disponível em: <<http://geo.polymtl.ca/~giroux/cours/gml6201a/articles/annan01.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2011.

ANNAN, A. P. **GPR - History, trends, and future developments.** Subsurface Sensing Technologies and Applications, 3 (4): p.253-270, 2002. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1023/A:1020657129590#>>. Acesso em: 10 jul. 2011.

BARBOZA, E. G. **Terraços da margem leste da Laguna dos Patos, litoral médio do Rio Grande do Sul: estratigrafia e evolução holocênica.** 1999. 138 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - UFRGS, Porto Alegre, 1999.

BORGES, W. R. **Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se de georadar e eletrorresistividade.** 2002. 137 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica), IAG/USP, São Paulo, 2002.

BORGES, W. R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP.** 2007. 260 p. Tese (Doutorado em Geofísica), IAG/USP, São Paulo, 2007.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 716 p.

CASSIDY, N. J. Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids. In: JOL, H. M. (Org.) Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science, p. 41-72, 2009.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento Digital de Imagens.** Curitiba: Editora Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, 2004. 219 p.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.9, n.4, p. 475-480, 2005.

CPRM (Serviço Geológico do Brasil). Projeto Curitiba: **Atlas geoambiental da região metropolitana de Curitiba**: subsídios para o planejamento territorial. São Paulo, 1998. 48 p.

CRÓSTA, A. P.; SOUZA, C. R. de. Sensoriamento Remoto. **Anuário Fator GIS**. 1 ed.: o guia de referência do Geoprocessamento. p. 10-21, Sagres, Curitiba, 1997.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting, [S.I.]**, n. 37. p. 531-551, 1989.

DOOLITTLE, J. A., MINZENMAYER, F. E., WALTMAN, S. W., BENHAM, E. C., TUTTLE, J. W., PEASLEE, S. D. Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States. **Geoderma**, v. 141, p. 416–421, 2007. Disponível em: <<http://naldc.nal.usda.gov/download/3850/PDF>>. Acesso em: 10 jul. 2011.

DOOLITTLE, J. A.; BUTNOR, J. R. **Soils, peatlands, and biomonitoring**. In: JOL, H. M. (Org.). Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science, p. 179-202, 2009.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Base para leitura de mapas de solos**. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Série Miscelânea, 4. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1981. 91 p.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

ESPINDOLA, C. R. A pedologia e a evolução das paisagens. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, 31 (1/2), 67-92, 2010.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélite para Estudos Ambientais**. Oficina de Textos. São Paulo, 2002.

GALVÃO, F.; RODERJAN, C. V.; KUNIYOSHI, Y. S. Sucessão vegetacional na planície litorânea paranaense – PSAMOSERE. **Ecologia Florestal e Fitogeografia Florestal**. UFPR. Curitiba, s.d.

GAZDAG, J.; SGUAZZERO, P. **Migration of Seismic Data**. Proceedings of the IEEE, 72 (10): p. 1302 – 1315, 1984.

GSSI - Geophysical Survey Systems, Inc / Alpha Geofísica - Brasil, **Opções de antenas de georadar**. Disponível em: <http://www.alphageofisica.com.br/gssi/Georadar_conceito.htm>. Acesso em: 02/05/2011.

GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc). **RADAN Version 6.6: Manual**. Salem, New Hampshire – USA, 2009. 227 p.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - Eletromagnetismo**. v. 3, 9. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2012. 419 p.

HARRISON, R.; RICHTER, D.; FOX, T. R. Deep Soils. **Forest Science**. 57(1): p. 1-2, 2011.

HOLDEN, J. Hydrological connectivity of soil pipes determined by ground-penetrating radar tracer detection. **Earth Surface Processes Landforms**, n. 29, p. 437-442, 2004.

HOWE, A. **Ground penetrating radar for the parameterization of subsurface hydrological properties**. 2000. 272 p. PhD Thesis, King's College London, Department of Geography, University Of London, London, 2000.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Manual de técnico de pedologia**. Série Manuais Técnicos em Geociências. 2. ed., n. 4. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 316 p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009. 585 p.

JORGE, J. A. **Matéria orgânica**. In: MONIZ, A. C. (Org.). Elementos de pedologia. p. 169-177. São Paulo: Editora Polígono S.A. 1972.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de Exploração**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 438 p.

LAPEN, D. R.; MORRMAN, B. J.; PRICE, J. S. Using ground penetrating radar to delineate subsurface features along a wetland catena. **Soil Science Society of America Journal**. 60, p. 923–931, 1996.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 216 p.

LEPSCH, I. F. **19 lições de Pedologia**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456 p.

LUDWIG, R.; GERHARDS, H.; WOLLSCHLAGER, P. K. U.; BUCHNER, J. **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics**. Practical Course Environmental Physics. Institute of Environmental Physics, Heidelberg University, 2011. 63 p. Internal Report. Disponível em: < http://www.iup.uni-heidelberg.de/institut/studium/lehre/Practical_Course/F52F53_GeoPhysics.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2011.

McCLYMONT, A. F.; HAYASHI, M.; BENTLEY, L. R.; MUIR, D.; ERNST, E. Groundwater flow and storage within an alpine meadow-talus complex. **Hydrology and Earth System Sciences**, n. 14, p. 859–872, 2010.

McNEILL, J. D. **Electromagnetics terrain conductivity measurement at low induction numbers**. Tech. Note TN-6, 13 p. Geonics Ltd, Mississauga, Ontario, Canada, 1980.

MIGUENS, A. P. **Noções sobre geração, transmissão, propagação e recepção das ondas eletromagnéticas e acústicas**. Navegação: a ciência e a arte. v. III, p. 1221-1264, 2000. Disponível em: < <http://www.mar.mil.br/dhn/bhmn/download/cap-34.pdf>> Acesso em: 19 dez. 2011.

MINEROPAR (Minerais do Paraná S/A). **Folha Geológica de Curitiba**. (1:250.000). Paraná, 2005.

MIRANDA, J. M.; LUIS J. F.; COSTA P. T.; SANTOS F. M. **Fundamentos de geofísica**. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Portugal, 2000. Disponível em: <http://idl.ul.pt/sites/idl.ul.pt/files/docs/fundamentos_geofisica_0.pdf> Acesso em 19 dez. 2011.

MOURA, A. C. M. **Contribuições metodológicas do geoprocessamento à geografia: geoprocessamento – “o estado da arte”**. 2000. Tese (Doutorado em Geografia), UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

MUNSELL COLOR COMPANY. **Munsell soil color charts**. New York: Macbeth, 2000.

NEAL, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth-Science**. Reviews. n. 66, p. 261–330, 2004.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. G. **Dois testes de imageamento com GPR em problemas de controle ambiental em regiões tropicais: migração de dunas e localização de dutos de óleo enterrados**. 2001. 95 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN, Natal, 2001.

PARASNIS, D. S. **Principles of applied geophysics**, 5. ed. London: Springer, 1996. 456 p.

PORSANI, J. L. **Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta Metodológica de Emprego em Estudos Geológico-Geotécnicos nas Regiões de Rio Claro e Descalvado – SP.** 1999. 145 p. Tese (Doutorado em Geofísica). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1999.

PORSANI, J. L.; MENDONÇA, C. A.; BETTENCOURT, J. S.; HODO, F. Y., VIAN, J. A. J.; SILVA, J. E. Investigações GPR nos Distritos de Santa Bárbara e Bom Futuro: Província Estanífera de Rondônia. **Revista Brasileira de Geofísica: SBGf**, v. 22, n. 1, 2004. Ano 5.

RAKSSA, M. L. **Análise estrutural da cobertura pedológica no primeiro planalto paranaense: estudo de caso na topossequência Fazenda Canguiri.** 2007. 116 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Curso de Pós-graduação em Geografia, Departamento de Geografia, UFPR, Curitiba, 2007.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics.** New York: John Wiley & Sons Ltd, 1997. 796 p.

RHOADES, J. D.; CHANDUVI, F.; LESCH, S. **Soil salinity assessment methods and interpretation of electrical conductivity measurements.** Irrigation and Drainage, n.57. 155 p. Rome: FAO, 1999.

ROBSON, D. A.; CAMPBELL, C. S.; HOPMANS, J. W.; HORNBuckle, B. K.; JONES, S. B.; KNIGHT, R.; OGDEN, F.; SELKER, J.; WENDROTH, O. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed – scale observatories: a review. **Vadose Zone Journal: Review and Analysis**, v. 7, n. 1, p. 358-389, 2008.

ROSA, M. L. C. da C. **Análise gravimétrica e magnetométrica da região sul da província costeira do Rio Grande do Sul, setor sudoeste da bacia de Pelotas.** 2009. 80 p. Dissertação (Mestrado em Geociências). UFRGS, Porto Alegre, 2009.

SAARENKETO, T. Electrical Properties of Water in Clay and Silty Soils. In: SATO, M. & VERSTEEG, R. (eds) Ground penetrating radar (GPR '96). **Journal of Applied Geophysics**. v. 40 (1-3), p. 73–88, Elsevier, 1998.

SAARENKETO, T. **Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys.** 2006. 127 p. PhD Thesis, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Finland, 2006. Disponível em: < <http://www.general-files.com/go/151077006900>> Acesso em: 24/09/2011.

SANTOS, L. J. C.; FIORI, C. O.; CANALI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA, J. M. F.; ROSS, J. S. Mapeamento geomorfológico do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, p. 3-11, 2006.

SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. n. 34, p. 299-307, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v34n2/v34n2a03.pdf>> Acesso em: 21 mar. 2012.

SBGf (Sociedade Brasileira de Geofísica). **O que é geofísica**. Disponível em: <<http://www.sbgf.org.br/geofisica/geofisica.html>>. Acesso em: 21 jun. 2012.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. 2. ed. São Carlos: RIMa, 2007. 153 p.

SUCRE, E. B.; TUTTLE, J. W.; FOX, T. R. The use of ground-penetrating radar to accurately estimate soil depth in rocky forest soils. **Forest Science**. 57(1): p. 59-66, 2011.

THOMAS, A. M.; ROGERS, C. D. F.; METJE, N.; CHAPMAN, D. N. **Soil electromagnetic mapping for enhanced gpr utility location**. Proceedings of the 25th International Conference on Trenchless Installation of Utilities, Rome, Italy, 2007. Disponível em: <<http://www.general-files.com/go/151077006900>> Acesso em: 17 out. 2011.

WARD, S. H.; HOHMANN, G. W. **Electromagnetic Theory for Geophysical Applications**. In: NABIGHIAN, M. N. (ed). *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. v. 1, (3), p.131-311. Society of Exploration Geophysicists, 1988.

WUTKE, A. C. P.; CAMARGO, O. A. **Adsorção e troca iônica**. In: A.C. Moniz (coord.). *Elementos de pedologia*. p. 125-147. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo & Editora Polígono, 1972. 459 p.

VIEIRA, L. S. **Manual da ciência do solo**. 1. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1975. 464 p.

XAVIER NETO, P.; MEDEIROS, W. E. A. A Practical Approach to Correct Attenuation Effects in GPR Data. **Journal of Applied Geophysics**. v. 59 (2), p. 140–151, Elsevier, 2006.