

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JEAN CARLOS ANDRADE DE CARLI

**APLICAÇÃO DE GPR PARA ESTIMAR ESPESSURA E DISPOSIÇÃO LATERAL
DE HORIZONTES DO SOLO E DO EMBASAMENTO GRANÍTICO A SUDESTE DO
CAMPUS 2 DA UNIPAMPA CAMPUS CAÇAPAVA DO SUL**

Caçapava do Sul

2016

JEAN CARLOS ANDRADE DE CARLI

**APLICAÇÃO DE GPR PARA ESTIMAR ESPESSURA E DISPOSIÇÃO LATERAL
DE HORIZONTES DO SOLO E DO EMBASAMENTO GRANÍTICO A SUDESTE DO
CAMPUS 2 DA UNIPAMPA CAMPUS CAÇAPAVA DO SUL**

Trabalho de conclusão de curso de
Graduação em Geofísica pela
Universidade Federal do Pampa como
requisito para obtenção do Título de
Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. FELIPE GUADAGNIN

**Caçapava do Sul
2016**

JEAN CARLOS ANDRADE DE CARLI

**APLICAÇÃO DE GPR PARA ESTIMAR ESPESSURA E DISPOSIÇÃO LATERAL
DE HORIZONTES DO SOLO E DO EMBASAMENTO GRANÍTICO A SUDESTE DO
CAMPUS 2 DA UNIPAMPA CAMPUS CAÇAPAVA DO SUL**

Trabalho de conclusão de curso de
Graduação em Geofísica pela
Universidade Federal do Pampa como
requisito para obtenção do Título de
Bacharel em Geofísica.

Orientador: FELIPE GUADAGNIN

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em: 01 / 12 / 2016
Banca examinadora:

Prof. Dr. Felipe Guadagnin (Orientador)
UNIPAMPA

Prof. Dr. Everton Frigo
UNIPAMPA

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
UNIPAMPA

RESUMO

O GPR (*Ground Penetrating Radar*) tem sido utilizado como ferramenta de investigação em subsuperfície em estudos de delineamento de horizontes e disposição lateral do embasamento rochoso como alvos de interesse em diversas áreas. Este estudo tem por objetivo delinear a extensão lateral dos horizontes do solo e do embasamento rochoso granítico, assim como analisar qualitativamente as propriedades do solo de textura e umidade. A área estudada abrange aproximadamente 5400 m² e está localizada no campus 2 da Unipampa de Caçapava do Sul, no qual servirá de base para futuras edificações. A área de estudo foi dividida em 12 linhas, formando uma malha de 15 m x 15 m, estando 7 linhas posicionadas paralelamente a cada 15 m e orientadas à N30 e as demais cruzando estas perpendicularmente sobre o mesmo espaçamento entre linhas mas com orientação N300. Estando as linhas N300 com comprimento de 90 m. As linhas 1 e 2 orientadas à N30 com comprimento de 77 e 79 m, e as demais linhas N30 com comprimento de 60 m. O sistema de aquisição foi realizado com o arranjo *common offset* com antenas blindadas de frequência central de 80 MHz, janela de amostragem de 400 ns, 512 amostras por traço, espaçamento entre antenas de 0,45 m e espaçamento entre traços de 0,048 m. Sendo todos os parâmetros de amostragem previamente analisados de acordo com o teorema de amostragem de Nyquist. Foram coletados um total de 906 m de radargramas. Afim de integrar dados de profundidade *in situ*, foram realizadas 10 sondagens manuais com cavadeira articulada e trado. Obtendo valores de profundidade da camada do solo entre valores de 0,03 m a 1,27 m. Com a integração dos dados de sondagem e de GPR foi possível calcular com êxito os valores para a constante dielétrica e a velocidade da onda eletromagnética no solo sendo estes 11,64041 e 0,08793 m.ns⁻¹. As antenas de 80 MHz, apresentaram ótimos refletores em profundidades inferiores a 1 m. O perfil geológico final interpretado foi apresentado com a camada de solo orgânico com espessura de 0,5 a 0,6 m. Região de rocha inconsolidada de aproximadamente 2 m de espessura e o topo do embasamento granítico na profundidade de 4 m.

Palavra-chave: GPR. Estudo de solo. Delineamento do embasamento rochoso.

ABSTRACT

GPR (Ground Penetrating Radar) has been used as a subsurface research tool in studies of horizontal delineation and lateral arrangement of the rocky basement as targets of interest in several areas. The objective of this study was to delineate the lateral extension of the soil horizons and the granite rock basement, as well as to analyze the soil properties of texture and moisture. The studied area covers approximately 5400 m² and is located on campus 2 of Unipampa of Caçapava do Sul, which will serve as a base for future buildings. The study area was divided into 12 lines, forming a mesh with 15 m x 15 m ballots, with 7 lines positioned parallel to each 15 m and oriented to the N30 and the others crossing these perpendicularly on the same line spacing but with N300 orientation. Being the N300 lines with a length of 90 m. Lines 1 and 2 oriented to the N30 with length of approximately 75 m, and the other lines N30 with length of 60m. The acquisition system was realized with the common offset arrangement with armored antennas of 80 MHz central frequency, sampling window of 400 ns, frequency of sampling of 512 MHz, spacing between antennas of 0.45 m and spacing between traces of 0.048 m. All sampling parameters were previously analyzed according to the Nyquist sampling theorem. A total of approximately 900 m of radargrams were collected. In order to integrate in-depth depth data, 10 manual drillings were performed with a drill and a drill. Obtaining depth values of the soil layer between values of 0.03 m to 1.27 m. With the integration of the data of probing and GPR, it was possible to calculate the values for the dielectric constant and the speed of the electromagnetic wave in the soil, being these 11.64041 e 0.08793 m.ns⁻¹. The 80 MHz antennas presented excellent reflectors at depths of less than 1 m. The interpreted final geological profile was presented with the organic soil layer with a thickness of 0.5 to 0.6 m. Layer of unconsolidated rock approximately 2 m thick and the top of the granitic basement at depth 4 m.

Keyword: GPR. Soil study. Design of the rocky basement.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	7
2	Objetivos	8
2.1	Específicos.....	8
3	Justificativa	9
4	Localização da área de estudo.....	9
5	O Complexo granítico de Caçapava do Sul	11
5.1	Pedologia de Caçapava do Sul	13
6	GPR – <i>Ground Penetrating Radar</i>	15
6.1	A teoria eletromagnética, equações de Maxwell e as equações constitutivas.....	16
6.1.1	Natureza da onda e do campo eletromagnético	19
6.1.2	Propagação da onda eletromagnética.....	21
6.1.3	Transmissão e trajetória do sinal.....	22
6.1.4	Zona de influência e resolução.....	24
6.2	Instrumentação do GPR.....	28
6.2.1	Caracterização e elementos do sistema	29
6.2.2	Alcance das frequências e performance do sistema de GPR.....	30
6.2.3	Frequência central e largura de banda.....	32
6.2.4	Critério de amostragem e frequência de Nyquist	33
6.2.5	Arranjos e levantamentos	34
6.3	GPR em estudos do solo	35
7	Levantamento Geofísico de Campo.....	39
8	Resultados	41
8.1	Sondagens.....	41
8.2	GPR	45
8.3	Integração dos resultados de GPR e Sondagens	53
9	Conclusões.....	62
10	Referências.....	64
	ANEXO A – Domínios pedológicos de Caçapava do Sul.....	69
	ANEXO B – <i>Clutter</i>	72

1 Introdução

A natureza, composição e espessura de camadas dos solos são inferidos localmente por pesquisadores com um número limitado de pontos observados devido a maneira com que perfis de solo *in situ* são examinados sendo estes por trincheiras, sondas e perfis de solo exposto. Com isso, análises e observações de características do solo torna-se muito restrita e pontual. Logo, há a necessidade da geração de análises laterais em perfis de forma prática, rápida e confiável (ALLRED et al., 2008).

A utilização de métodos indiretos para auxiliar em estudos do subsolo iniciou na década de 1920 com o uso de difração de raios-x para determinação de arranjos atômicos em minerais. Desde então tem-se utilizado ferramentas de análises indiretas para classificação parcial de solos e suas propriedades (HELMS et al., 2002). Embora nem todo o espectro eletromagnético fora utilizado para análises em solos, rochas e minerais desde o início dos primeiros estudos em 1920, utiliza-se hoje todo o espectro eletromagnético como fonte de transmissão e recepção de sinais. Utilizando ondas de longos períodos em estudos de indução eletromagnética até ondas de curto período como raios-x e radiação gama em apoio a estudos do solo e suas propriedades (MCBRATNEY et al., 2003).

Métodos geofísicos elétricos, magnéticos, eletromagnéticos, radiométricos e sísmicos tornaram-se rotineiros em aplicações à estudos do solo com finalidade ambiental, geotécnica e agrária. Porém, tem-se que os métodos com melhor desempenho para estudos do solo o de resistividade elétrica e o de radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar* – GPR; HARTMINK, 2014). Mesmo havendo a necessidade da aplicação de outros métodos geofísicos para análise dos solos e estruturas do embasamento rochoso de acordo com peculiaridades de propriedades físicas locais, todos são direcionados diretamente ou indiretamente com análises de GPR para conclusões finais (ALLRED et al., 2008).

O GPR destaca-se dentro da análise de perfis de solo na determinação de limites entre domínios pedológicos, horizontes, espessura, umidade, assim como para determinação do posicionamento em profundidade de raízes, tubulações, nível freático, fragmentos de rocha e disposição do embasamento rochoso (DOOLITTLE & COLLINS, 1995).

O resultado de um estudo de GPR depende diretamente do contraste entre a permissividade dielétrica entre o alvo e o ambiente. Portanto, devido a existência de inúmeros ambientes com materiais e objetos contrastantes dieletricamente combinado com um amplo espectro de frequências utilizadas em antenas, fazem do GPR uma ferramenta de investigação de escala espacial variando de centenas de metros à centímetros (JOL, 2009).

Mesmo com o avanço tecnológico nos equipamentos para análise dos atributos do solo, ainda há a necessidade do desenvolvimento e popularização de métodos geofísicos na qual possa mensurar e caracterizar rapidamente todo o perfil do solo lateralmente e não somente com dados pontuais de amostragem. Portanto, este trabalho tem como objetivo a aplicação de GPR para delinear a extensão lateral dos horizontes do solo e do embasamento rochoso, assim como analisar qualitativamente as propriedades do solo de textura e umidade; em local com embasamento granítico próximo a superfície em uma área na qual servirá para futuras instalações da Universidade Federal do Pampa do campus de Caçapava do Sul.

2 Objetivos

Utilizar o método geofísico de GPR para delinear a extensão lateral dos horizontes do solo e do embasamento rochoso, assim como analisar qualitativamente as propriedades do solo de textura e umidade.

2.1 Específicos

Utilizar o GPR como uma ferramenta de análise de propriedades do solo com fins designados a estudos geotécnicos, agrários, ambientais, pedológicos, hidrológicos, geológicos, arqueológicos, estratigráficos, forenses entre outros.

Determinar a espessura da camada do solo dentro da área estudada para auxiliar em planejamentos futuros de construções civis sobre a área.

3 Justificativa

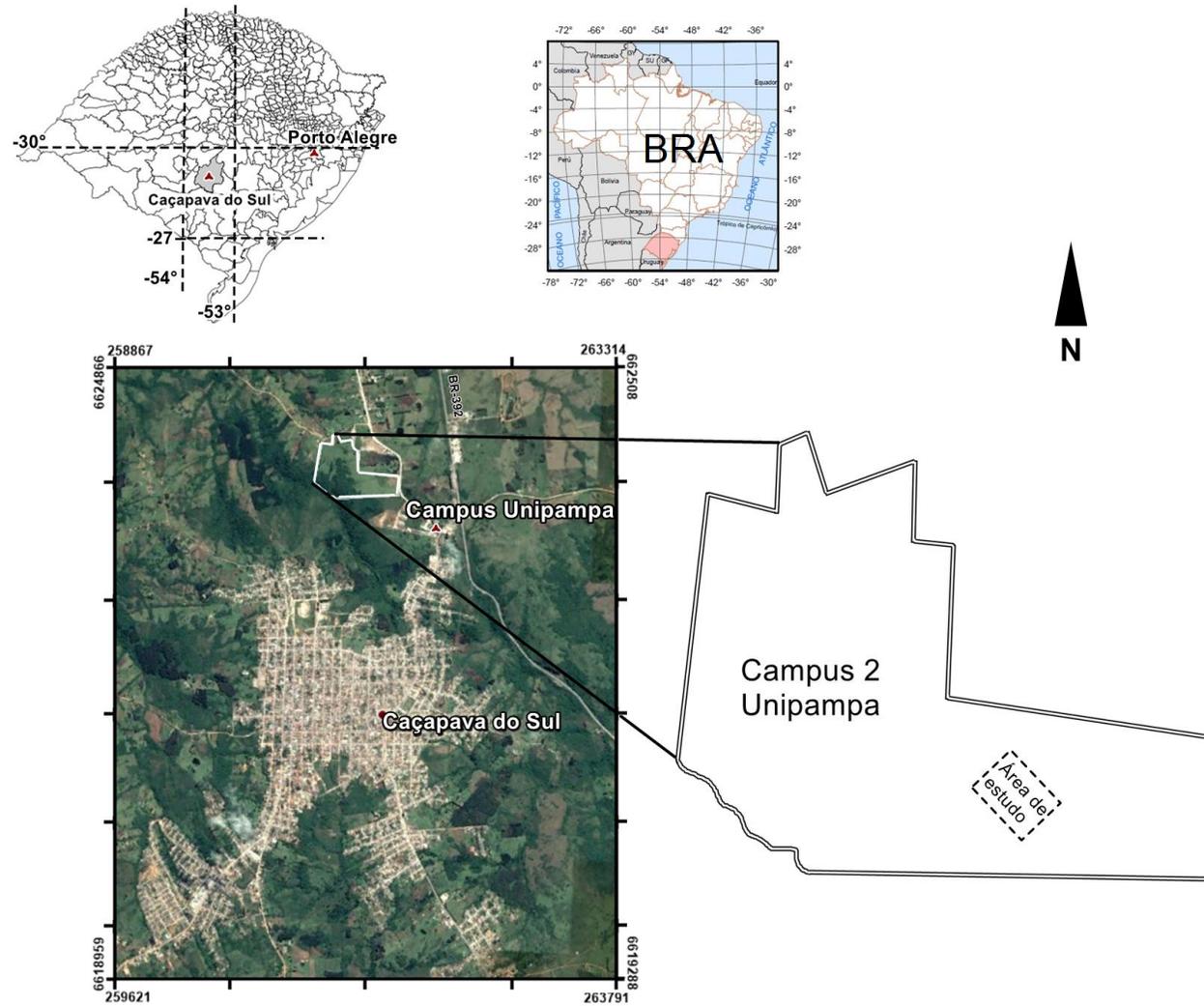
A área de estudo está localizada no campus 2 da Unipampa de Caçapava do Sul. Há a necessidade da melhor compreensão das propriedades do solo do local, assim como a profundidade do embasamento rochoso no qual servirá de suporte para os alicerces das edificações futuras do campus. Desta forma auxiliando diretamente no planejamento financeiro, operacional e geotécnico das instalações.

4 Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada dentro do campus 2 da Unipampa (Figura 1) no município de Caçapava do Sul no estado do Rio Grande do Sul. Estando o município a aproximadamente 260 km de distância pela BR-290 da capital do estado, Porto alegre; e a 102 km de distância pela BR-392 da cidade polo mais próxima, Santa Maria.

A área do campus 2 da Unipampa possui um espaço físico de 313780 m² e foi doado pela prefeitura municipal de Caçapava do Sul para a Unipampa no ano de 2015 para que sirva para futuras instalações do campus universitário na cidade.

Figura 1 – Localização da área de estudo.



Fonte: Modifício de Google Earth e Mapa Político do Estado do Rio Grande do Sul (IBGE). 2016; 2015.

5 O Complexo granítico de Caçapava do Sul

As rochas graníticas da região do município de Caçapava do Sul têm sido estudadas desde o ano de 1941 por Leinz *et al.*, assim sendo denominadas como Batólito Granítico de Caçapava do Sul posteriormente denominada como Granito de Caçapava do Sul (RIBEIRO *et al.*, 1966) e em seguida, após duas décadas, como Complexo Granítico de Caçapava do Sul (BITENCOURT, 1983). O complexo granítico Caçapava do Sul (Figura 2) é constituído de um corpo de aproximadamente 250 km² de extensão aflorante ao longo de uma zona de cisalhamento NE-SW, intrusivo em metamorfitos de baixo grau (BITENCOURT, 1983); sendo composto principalmente de granodioritos, monzogranitos e sienogranitos. Datações pelo método U-Pb com microsonda iônica de alta resolução em zircão revelavam populações de cristais com idades magmáticas de 561 ± 6 e 541 ± 11 Ma, e populações herdadas de 1,9 a 2,4 Ga (LEITE *et al.*, 1995).

Figura 2 - Contexto geológico da Suíte Granítica Caçapava do Sul.



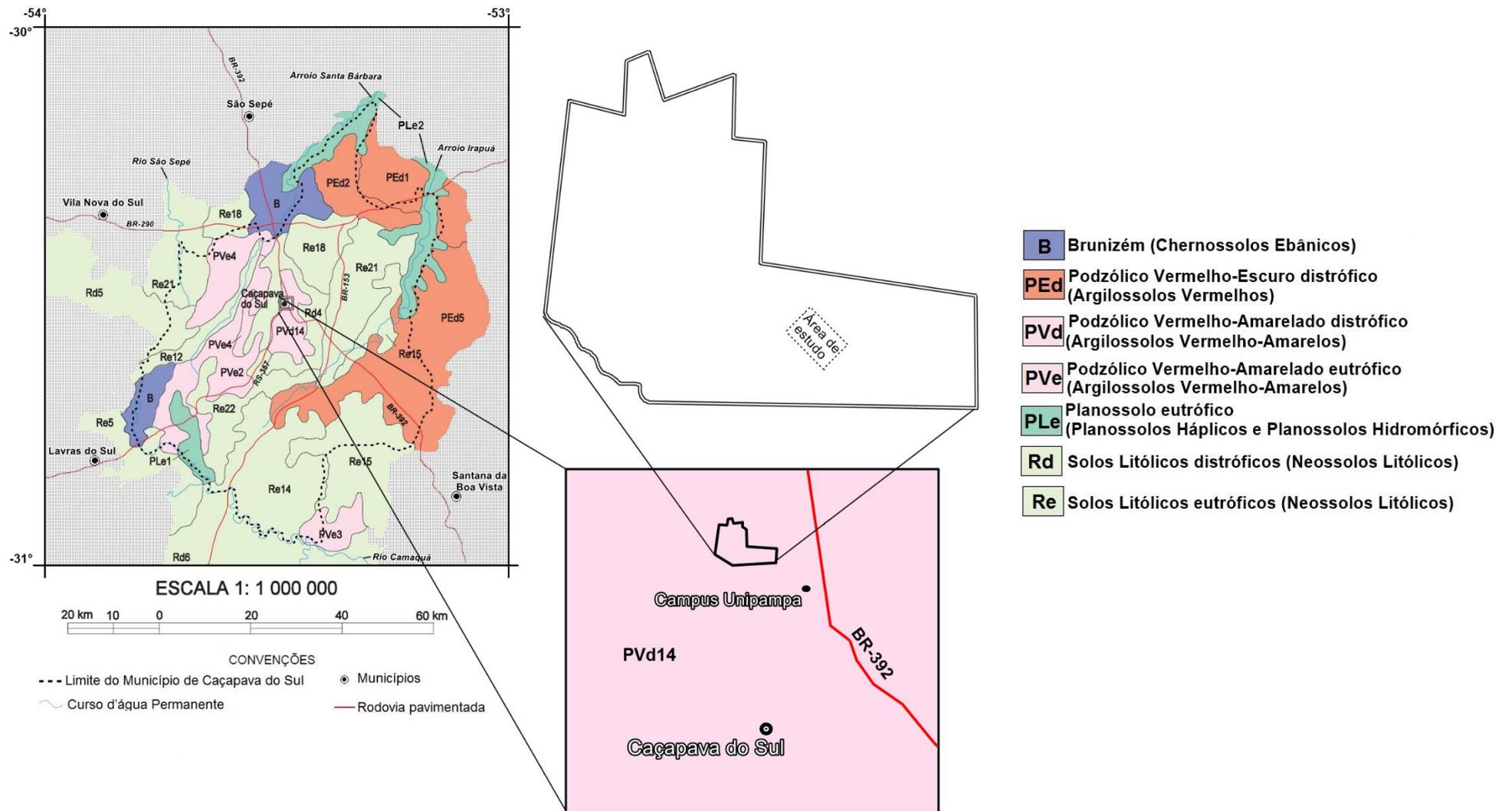
Fonte: Extraído e modificado de Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, CPRM, 2006.

5.1 Pedologia de Caçapava do Sul

O Estado do Rio Grande do Sul apresenta uma grande variedade de solos em seu território, resultado de sua complexidade e diversidade de formações geológicas e da ação climática regional (STRECK et al.,2002).

O município de Caçapava do Sul apresenta diversas formações geológicas, conseqüentemente diversos domínios pedológicos. Segundo o mapa exploratório de solos elaborado pelo Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais (DERNA) em 2002 e disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Caçapava do Sul possui dentro de seus limites municipais 7 domínios pedológicos (Figura 3), suas descrições de acordo com o mapa exploratório do DERNA estão apresentados no anexo A. Estando a área de estudo localizada no domínio PVd14, correspondendo a classificação de um solo podzólico vermelho-amarelado distrófico com textura média cascalhenta/argilosa e cascalhenta, com substrato migmatítico, relevo ondulado a forte ondulado.

Figura 3 - Domínios pedológicos no município de Caçapava do Sul.



Fonte: Extraído e modificado de Mapa Exploratório de Solos do Estado do Rio Grande do Sul, IBGE, 2002.

6 GPR – Ground Penetrating Radar

O GPR é um método não invasivo de estudo da subsuperfície no qual tem sido utilizado em estudos de solos desde os últimos anos da década de 1970. O GPR é utilizado para determinação de diferenças em espessuras e texturas em perfis de solo sendo melhor empregado em solos com baixo teor de argila e baixa condutividade elétrica (ALLRED et al., 2008).

Estudos de GPR têm sido aplicados para: estima de conteúdo de água no solo (SERBIN & OR, 2004), durante irrigações e drenagens (GALAGEDARA et al., 2005); identificação de vias de fluxo de fluidos e caminhos de perda de nitrogênio em subsuperfície (COLLINS et al., 1994; GISH et al., 2002, 2005; KOWALSKY et al., 2004; WALTHALL et al., 2001); aferir conteúdo de umidade capilar no subsolo (FREELAND et al., 2001); estudos para avaliação de espessura do concreto em túneis (XIE et al., 2009); detecção de minas terrestres metálicas e não metálicas (HARMAN, 2003; METWALY, 2006); em estudos forenses em alvos sob solo (DAVENPORT et al., 1988,1990; FRANCE et al., 1992,1997; KOPPENJAN, 2003) e concreto (FREELAND, et al., 2002; Miller et al., 2002); mapeamento de solos segundo aptidão mineralógica para cultivo agrícola (DOOLITTLE et al., 2002); determinação de espessura do solo e seus horizontes (FARRISH et al., 1989; SANCHEZ-RODRIGUEZ et al., 2002; KIMSEY et al., 2008); assim como camadas de solo congeladas entre a neve e o solo em ambientes glaciais (BUTNOR et al., 2013).

O método de GPR é um método eletromagnético que utiliza ondas de rádio com frequências entre 10 MHz a 2,5 GHz, para localizar estruturas e feições geológicas rasas da subsuperfície. Este método investiga a subsuperfície utilizando o campo eletromagnético que se propaga no solo. Assim os fundamentos do método de GPR encontram-se na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas (DANIELS, 2004). Inicialmente criado para investigações geológicas, atualmente é uma ferramenta de investigação de alta empregabilidade em materiais como asfalto, concreto e madeira, incluindo estudos de raízes assim quanto a estrutura interna dos troncos das árvores (JOL, 2009).

6.1 A teoria eletromagnética, equações de Maxwell e as equações constitutivas

A teoria eletromagnética está fundamentada nas equações de Maxwell, nas quais descrevem matematicamente a física dos campos eletromagnéticos e seus comportamentos vetoriais em qualquer meio. Todos os fenômenos eletromagnéticos existentes estão ligados intrinsecamente às equações de Maxwell (JOL, 2009).

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Eq (1)}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Eq (2)}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{Eq (3)}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Eq (4)}$$

Onde:

\vec{E} é o vetor campo elétrico em (V/m);

\vec{B} é o vetor de densidade de fluxo magnético (Tesla);

\vec{H} é o vetor de intensidade de campo magnético (A/m);

\vec{J} é o vetor de densidade de corrente elétrica (A/m²);

\vec{D} é o vetor deslocamento elétrico (C/m²);

t é o tempo (s)

ρ é a densidade de carga elétrica (C/m³).

Como essas equações não apresentam relações diretas com as propriedades físicas do meio, faz-se necessário apresentar as relações constitutivas (equações 5, 6, 7). Relações constitutivas são a forma de descrever a resposta do meio ao campo eletromagnético em relação a propriedades elétricas e magnéticas deste. A primeira relação constitutiva (equação 5) corresponde à uma expressão derivada da lei de Ohm, e relaciona a densidade de corrente de condução (\vec{J}) ao campo elétrico (\vec{E}), sendo descrita como (DANIELS, 2004; JOL 2009):

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{Eq (5)}$$

Nos materiais geológicos simples, essa relação é aproximadamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica (σ), na qual caracteriza o movimento livre de cargas, criando corrente elétrica, quando um campo elétrico está presente. A condutividade elétrica de um material é uma medida de sua habilidade em conduzir corrente elétrica, e é expressa em Siemens por metro (S/m). Os principais fatores que afetam a condutividade elétrica nos materiais são: conteúdo de água, a porosidade (espaços vazios entre os grãos minerais), a salinidade (o aumento da concentração de sais na água aumenta a condutividade proporcionalmente), e o conteúdo de argilas e de minerais condutivos (a argila é tipicamente muito condutiva) (DANIELS, 2004; JOL 2009).

A segunda relação constitutiva (equação 6) associa diretamente o campo elétrico (\vec{E}) à corrente de deslocamento (\vec{D}) (ou polarização) pela constante de proporcionalidade (ϵ) que é a permissividade dielétrica do material, na qual caracteriza o deslocamento de cargas restringidas na estrutura do material na presença de um campo elétrico (DANIELS, 2004; JOL 2009):

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad \text{Eq (6)}$$

A corrente de deslocamento é caracterizada pela movimentação dos elétrons, núcleos e moléculas polares da posição de equilíbrio neutro para outra (polarizada), devido à influência de um campo elétrico externo. Tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade dielétrica são importantes, porque afetam a atenuação das ondas e a sua propagação. Em geral a condutividade é dominante para as ondas eletromagnéticas de baixas frequências ($f < 1$ MHz) enquanto que em altas frequências ($f > 1$ MHz) a permissividade dielétrica é dominante (DANIELS, 2004; JOL 2009).

A terceira relação constitutiva (equação 7) associa o campo magnético (\vec{H}) com o campo de indução magnética (\vec{B}), sendo a constante de proporcionalidade a permeabilidade magnética do material (μ) que descrevem a quão íntima são as

respostas de momentos magnéticos atômicos e moleculares à um campo magnético aplicado (DANIELS, 2004; JOL 2009):

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \text{Eq (7)}$$

Em muitas situações geológicas, os fatores mais importantes que controlam as respostas do GPR são devido às propriedades elétricas. Para a propagação de ondas eletromagnéticas nas frequências do radar, supõe-se que a permeabilidade magnética da maioria dos materiais geológicos é essencialmente independente da frequência e não varia significativamente em relação à permeabilidade magnética do espaço livre. Portanto, o efeito da variação na permeabilidade magnética não tem sido considerado quando são feitas medidas eletromagnéticas na Terra ($\mu = \mu_0$ onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m).

Em muitos problemas de propagação de campos eletromagnéticos em meio terrestres as seguintes suposições são feitas: os meios são lineares, isotrópicos, homogêneos, e possuem propriedades elétricas que são independentes do tempo, temperatura ou pressão; e a permeabilidade magnética μ é assumida como a permeabilidade magnética do vácuo, $\mu = \mu_0$ (DANIELS 2004). Porém, σ , ϵ e μ são tensores e podem também ser não lineares. Por motivos práticos de GPR em levantamentos, os valores destes tensores são tratados como escalares independentes em campo. Em outras palavras, a resposta é na mesma direção do campo excitado e é independente da força do campo. Para estudos de GPR, a permissividade dielétrica é a relação mais importante, por vezes considerado como constante dielétrica (k) esta relação é usada e definida como (JOL, 2009):

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

Onde, ϵ_0 é a permissividade dielétrica no vácuo $8,89 \times 10^{-12}$ F/m (JOL, 2009).

6.1.1 Natureza da onda e do campo eletromagnético

Existe a dependência direta da magnitude relativa da perda de energia (associada à condutividade) para a energia armazenada (associada à permissividade e permeabilidade), desta maneira os campos podem difundir ou propagar como ondas; sendo que, para estudos de GPR serem viáveis as condições do meio devem ser favoráveis para respostas do sinal de radar como propagação de onda (JOL, 2009).

O caráter de onda torna-se mais evidente quando as equações de Maxwell são reformuladas afim de eliminar o campo elétrico ou o campo magnético. Utilizando o campo elétrico e reformulando os parâmetros temos a equação para o vetor da onda (JOL, 2009):

$$\begin{array}{c} \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \uparrow A \quad \uparrow B \end{array} \quad \text{Eq (9)}$$

Estudos com GPR são eficientes em materiais com baixa perda de energia, onde a energia de dissipação (termo A na equação 9) é menor do que a energia armazenada no material penetrado (termo B na equação 9) (JOL, 2009).

Em levantamento de GPR, normalmente o campo medido é o campo elétrico envolvido, sendo expresso por (JOL, 2009):

$$\bar{E} = f(\vec{r} \cdot \hat{k}, t) \hat{u} \quad \text{Eq (10)}$$

Onde, \vec{r} é o vetor no qual descreve a posição espacial e $f(\vec{r} \cdot \hat{k}, t)$ satisfazem a equação escalar 12; sendo $\beta = \vec{r} \cdot \hat{k}$ a distância na direção de propagação (JOL, 2009):

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\alpha \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) \equiv 0 \quad \text{Eq (11)}$$

Em condições de baixa perda,

$$f(\beta, t) \approx f(\beta \pm vt) e^{\mp \alpha \beta} \quad \text{Eq (12)}$$

Onde:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad \text{Eq (13)}$$

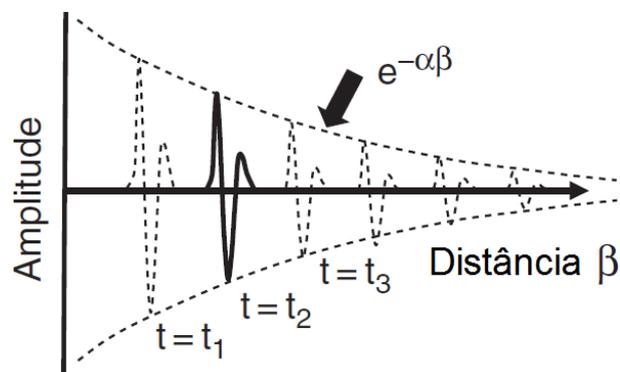
$$\alpha = \frac{1}{2}\sigma\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \text{Eq (14)}$$

Sendo v a velocidade da onda e α a atenuação do sinal. Visando expressar termos em relação a movimentação senoidal da onda e de sua frequência angular (ω) obtém-se a equação 15, sendo demonstrado os instantes de tempo observados da natureza de propagação da onda na figura 4 para um pulso mínimo de radar. Sendo que sinais senoidais são caracterizados por sua frequência angular (ω) e pelo comprimento de onda λ , sendo que $\lambda = 2\pi v/\omega$ (JOL, 2009).

$$f(\beta, t) = A \exp\left(-\left(i\left(\frac{\beta}{v} - \omega t\right)\right)\right) e^{-\alpha\beta} \quad \text{Eq (15)}$$

Onde A é o pico da amplitude do sinal.

Figura 4 - Em ambientes de baixa perda de sinal o campo eletromagnético em uma velocidade finita decai em amplitude do pulso com uma mudança mínima de forma (JOL, 2009).



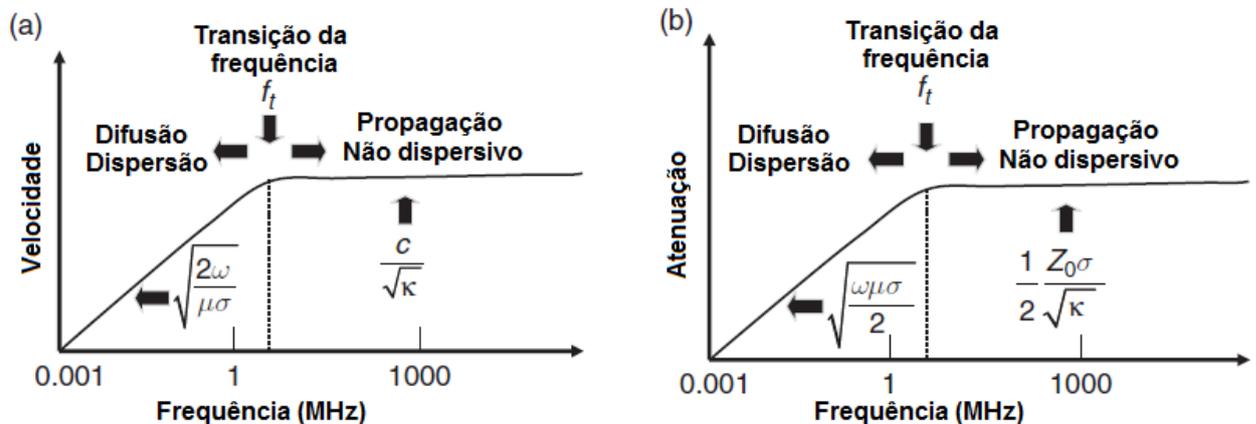
Fonte: modificado de Jol, 2009.

6.1.2 Propagação da onda eletromagnética

Todas propriedades da onda exibem um comportamento similar. Em baixas frequências, as propriedades da onda dependem da raiz quadrada da frequência angular (ω) empregada, indicando um comportamento difuso do campo. Em altas frequências, as propriedades tornam-se independentes da frequência do sinal, caso a permissividade dielétrica (ϵ), a condutividade elétrica (σ) e a permeabilidade magnética (μ) sejam independentes da frequência.

Para meios simples com permissividade, condutividade e permeabilidade fixas, a expressão mais fácil para seus comportamentos em tempo é um senóide. A similaridade de comportamento entre as propriedades da onda como a velocidade e atenuação *versus* a frequência do sinal é demonstrado na figura 5. Sendo que $\omega = 2\pi f$ (ANNAN, 2005).

Figura 5 - Variação de velocidade e atenuação em um meio simples, sendo c e Z_0 a velocidade e impedância no vácuo (ANNAN, 2003).



Fonte: Modificado de Annan, 2005.

Em estudos de GPR, o comportamento da onda em altas frequência é o caráter de maior importância. No caso de um meio simples, onde todas as componentes de frequência e velocidade variam e sofrem atenuação ao mesmo tempo, pode-se expressar a velocidade, atenuação e impedância como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\kappa}} \quad \text{Eq (16)}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{\sigma}{2} = Z_0 \frac{\sigma}{2\sqrt{k}} \quad \text{Eq (17)}$$

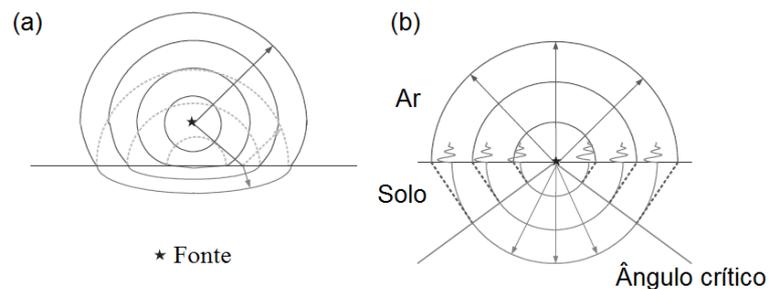
$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{k}} \quad \text{Eq (18)}$$

Como mencionado, na grande maioria dos casos de GPR, é assumido que a propriedade de permissividade magnética no meio seja igual ou próxima de seu valor no vácuo, sendo assim utiliza-se $\mu = \mu_0$ ($\mu_0 = 1,25 \times 10^{-6}$ H/m). A leitura do sinal do GPR normalmente exibe uma mudança ascendente gradual na velocidade e atenuação com a frequência dominante empregada pela fonte no meio. Segundo Annan (2005) as causas dessas mudanças são originadas por dois fatores em meio geológico. Primeiramente, a água presente nos poros da estrutura estudada começa a absorver muita energia à medida que a frequência empregada aumenta, no intervalo de 10 a 20 GHz. Segundo, perdas de sinal com o espalhamento do sistema, nas quais são diretamente dependentes de sinais de alta frequência.

6.1.3 Transmissão e trajetória do sinal

Estudos utilizando GPR podem ser conduzidos com antenas em contato com o solo, mais utilizado, ou próximas com uma certa altura. Na figura 6, Annan (2005), demonstra como uma frente de onda oriunda de uma fonte finita colide no solo. O campo em qualquer ponto pode ser definido como uma onda planar colidindo na interface do solo com um ângulo de incidência específico definido geometricamente, obedecendo a estudos de Fresnel e Snell (ANNAN, 2005).

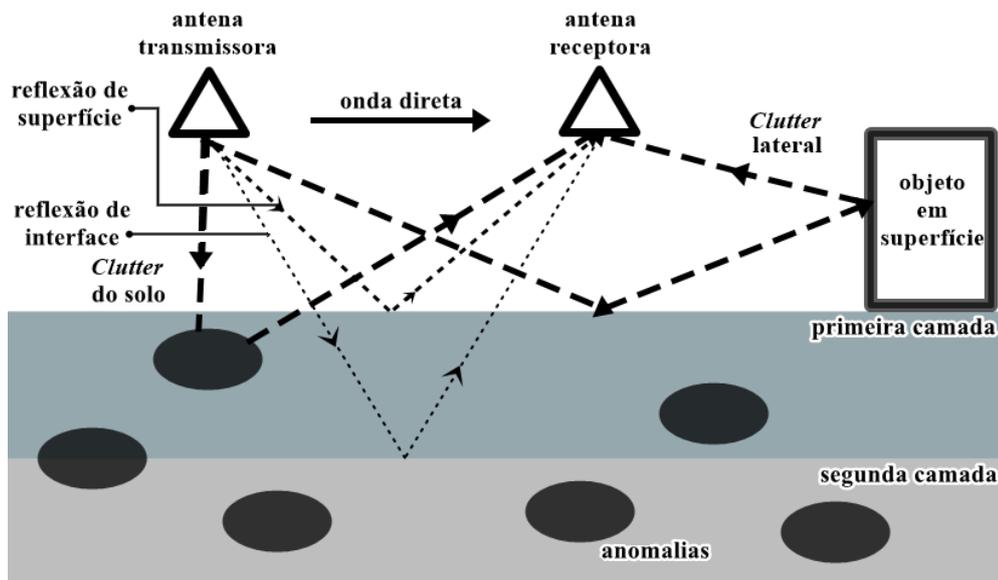
Figura 6 - Espalhamento de uma frente de onda originada de uma fonte pontual. A) fonte localizada acima do solo, linhas pontilhadas representando o sinal refletido. B) fonte localizada na interface ar e solo, com as linhas tracejadas indicando ondas refratadas, oscilantes indicando ondas evanescentes.



O alcance do sinal de GPR é principalmente controlado pelo total de caminhos de perda de sinal, sendo as perdas de sinal para o material penetrado, o espalhamento do modelo de aquisição e a perda pela reflexão do alvo (MILSON, 2003).

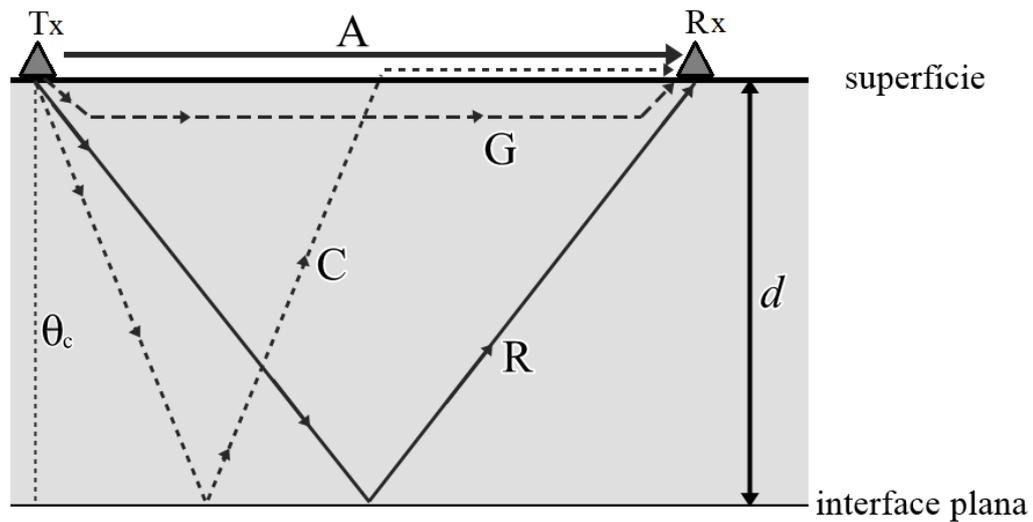
A partir do momento que um pulso é emitido pela antena transmissora, esta onda eletromagnética irá sofrer perdas de energia ao longo do percurso transmissão à recepção. Tais perdas de energia são oriundas de reflexão e interação com o solo assim quanto objetos e matérias que possam estar nas proximidades do local de aquisição de dados (Figura 7), causando assim sinais de *clutter* (Anexo B). Contudo as reflexões mais significativas registradas são oriundas dos caminhos transmissão e recepção ilustrados na figura 8 (ANNAN, 2005; JOL, 2009).

Figura 7 - Plano físico de um sistema de radar. Caminhos genéricos que as frentes de onda percorrem no sistema transmissão e recepção (DANIELS, 2004).



Fonte: Modificado de Daniels, 2004.

Figura 8 - Caminhos que o sinal transmitido da antena transmissora (Tx) à antena receptora (Rx) tratados como caminhos de raios da onda. A) onda direta. G) onda direta do solo. R) onda refletida. C) onda refratada. Sendo que os caminhos A, G, R os mais dominantes em respostas do sinal (JOL, 2009).



Fonte: Modificado de Jol, 2009.

6.1.4 Zona de influência e resolução

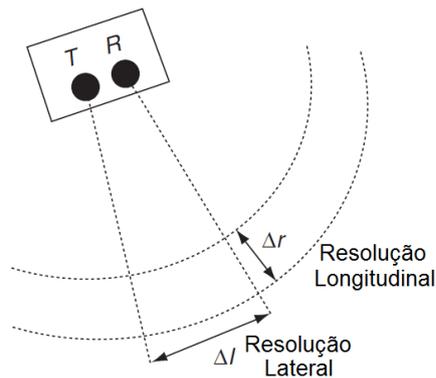
A resolução espacial adequada de um sistema de GPR em subsuperfície é de extrema importância devido os objetivos dos levantamentos geralmente ser relacionados a locação de pontos em superfície de alvos enterrados, como minas explosivas, canos, fios de alta-tensão, camada de cimento e ou asfalto, entre outros. Contudo ainda há, por vezes, a necessidade de distinguir objetos em uma mesma profundidade. A resolução espacial é definida por características da antena e do sinal empregado. Em uma aquisição com uso de GPR a escolha do equipamento a ser utilizado é de extrema importância para atender as necessidades específicas do estudo em questão. O equipamento escolhido deve atender de forma adequada os parâmetros entre resolução espacial, tamanho da antena, alcance do sinal a ser processado e a penetrabilidade no material, na qual na maioria dos casos está ligada com a frequência da antena utilizada. Contudo características do meio como argilominerais, água, matéria orgânica entre outros pode afetar a penetrabilidade do sinal no meio (DANIELS, 2004).

A resolução em estudos de GPR consiste no quão preciso a posição de um determinado objeto ou camada litológica pode ser determinada em profundidade, e quais atributos geométricos do alvo pode ser interpretado, tais como tamanho, forma, espessura, entre outros (DANIELS, 2004).

A resolução do sinal do GPR é de extrema importância, pois é com esta análise e regulagem deste parâmetro que pode-se aperfeiçoar o sinal e arranjo do levantamento. A Resolução do sinal de GPR é consistida por duas componentes, sendo estas a resolução longitudinal (alcance ou profundidade) e a resolução lateral (angular ou deslocamento lateral do sinal; Figura 9) (ANNAN, 2005).

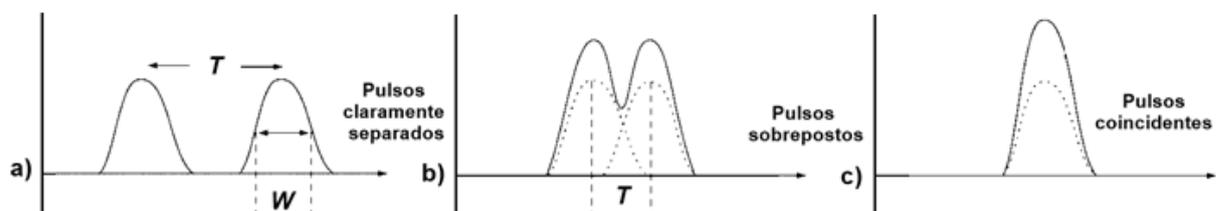
O conceito da resposta do sinal de GPR é aplicado em qualquer estudo que utilize um fenômeno de onda para detectar objetos a distância. Considera-se um sistema que gera pulsos e detecta ecos que são observados nos quais são réplicas próximas do pulso transmitido. Os ecos, sinais de respostas registradas, podem chegar à antena receptora simultaneamente, separados ou sobrepostos em tempo. Como demonstrado na figura 10 (ANNAN, 2005).

Figura 9 - Figura esquemática de resolução longitudinal e lateral do sinal do GPR.



Fonte: Modificado de Annan, 2005.

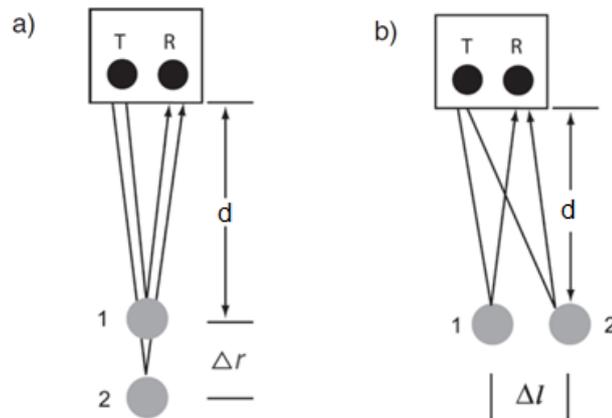
Figura 10 - Pulsos temporais com largura de $\frac{1}{2}$ de W . Pulsos são claramente separados quando $T \gg W$ (a). Pulsos sobrepostos (b). Eventos indistinguível, quando $T \ll W$ (c).



Fonte: Modificado de Annan, 2005.

A resolução lateral e longitudinal é determinada matematicamente analisando um sistema simples de respostas do sinal para dois alvos pontuais (Figura 11).

Figura 11 - alcance e resoluções laterais e longitudinais considerando dois alvos (1 e 2) alinhados (a) e lado a lado (b; ANNAN, 2005).



Fonte: Modificado de Annan, 2005.

Para dois alvos alinhados, 1 e 2, a diferença no tempo de percurso entre eles está relacionado a distância que os separam. O tempo de percurso para o primeiro alvo será determinado pela equação 19; para o segundo alvo a equação 20; e a diferença entre estes pela equação 21. Sendo que a diferença entre os dois tempos deve ser maior que a metade da metade da largura do pulso aplicado para que assim a resposta, eco recebido, seja distinguível (ANNAN, 2005).

$$t_1 = \frac{2d}{v} \quad \text{Eq (19)}$$

$$t_2 = \frac{2d+2\Delta r}{v} \quad \text{Eq (20)}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2\Delta r}{v} \quad \text{Eq (21)}$$

O comprimento da resolução longitudinal é dado pela equação 22; onde W é a largura do pulso de sinal emitido e v a velocidade do meio.

$$\Delta r \geq \frac{Wv}{4} \quad \text{Eq (22)}$$

Desta forma, pela equação acima, tem-se que a largura do pulso e a velocidade no meio determinam a resolução. O comprimento da resolução longitudinal é

essencialmente dependente da distância da fonte em um ambiente perfeito. Porém, em pratica, a atenuação e dispersão do sinal em grandes distâncias também irá afetar a resolução longitudinal (ANNAN, 2005).

A resolução lateral é determinada da mesma forma ao analisar a figura 11. Onde o tempo de percurso para o primeiro alvo é calculado com o uso da equação 19. E o tempo de percurso para o segundo alvo a partir da equação 23. E a diferença entre estes pela equação 24 (ANNAN, 2005).

$$t_2 = \frac{2(d^2 + \Delta l^2)^{1/2}}{v} \quad \text{Eq (23)}$$

$$\Delta t = \frac{2[(d^2 + \Delta l^2 - d^2)^{1/2}]}{v} \quad \text{Eq (24)}$$

Na maioria dos estudos, o alvo está a uma distância considerável do conjunto de antenas medidoras, desta forma, é considerado que a distância do arranjo entre as antenas é menor que a distância entre ponto medido em superfície e a profundidade ao alvo. Com isso temos que a diferença em tempo expressa como (ANNAN, 2005):

$$\Delta l \approx \frac{\Delta l^2}{vd} \quad \text{Eq (25)}$$

Sendo a resolução lateral expressa por:

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vdW}{2}} \quad \text{Eq (26)}$$

Desta forma, temos que a resolução lateral irá depender da velocidade do meio (v), da largura do pulso (W), e da distância entre o alvo e do sistema de leitura em superfície (d) (ANNAN, 2005).

A resolução lateral está relacionada com o conceito da zona de Fresnel, na qual expressa a mesma relação para interferência de sinais (senoidal) monocromático (ANNAN, 2005). Com sinais de GPR, a largura do pulso (W) está diretamente relacionada com a largura da banda (B) na qual está diretamente relacionada à frequência central utilizada (f_c) (ANNAN, 2005).

$$w = \frac{1}{B} = \frac{1}{f_c} \quad \text{Eq (27)}$$

Sendo o comprimento de onda da frequência central expressa pela equação 28, desta forma o comprimento da resolução lateral pode ser expresso pela equação 29 (ANNAN, 2005):

$$\lambda_c = \frac{f_c}{v} \quad \text{Eq (28)}$$

$$\Delta l = \sqrt{\frac{d\lambda_c}{2}} \quad \text{Eq (29)}$$

6.2 Instrumentação do GPR

Nas aplicações do GPR, geralmente, variações na permissividade dielétrica (ϵ) e na condutividade elétrica (σ) são mais importantes, enquanto variações na permeabilidade magnética (μ) são raramente consideradas. Na gama de frequência de 10 – 1000 MHz, a presença ou falta de água no ambiente geológico é de extrema importância para o comportamento da resposta do sinal de GPR no meio. Solos, rochas e construções possuem espaços vazios em suas estruturas, poros, onde geralmente são preenchidos com ar, água entre outros diversos materiais. A água, dentro todos os materiais que possam estar preenchendo os poros das estruturas, é o elemento natural que mais possui influencia na polarização da resposta do radar. Possuindo um alto valor para constante de permissividade dielétrica, (k) aproximadamente 80. A água presente nos poros dos materiais geológicos e de construções civis contem íons proveniente de diversas fontes, nos quais influenciam diretamente na determinação da condutividade dos materiais. Tipicamente solos e rochas apresentam uma condutividade entre 1 a 1000 mS/m (JOL, 2009).

O método de GPR possui uma enorme empregabilidade e aplicações. Sendo estas desde estudos relacionados a geologia, hidrologia, pedologia, contaminantes ambientais, geotecnia, planejamento urbano, arqueologia, explorações planetárias e aplicações militares e forensicas (ALLRED et al., 2008).

A seleção das frequências de operações e do tipo de antenas e suas polarizações dependem de inúmeros fatores. Incluindo: a grandeza e forma do alvo a ser estudado, as propriedades de transmissão do meio a ser penetrado e dos requerimentos operacionais definidos pela finalidade econômica ou acadêmica de todo serviço operacional. A especificação de um tipo particular de sistema de operação de GPR pode ser preparado examinando vários fatores nos quais influenciam a profundidade e resolução dos alvos. Afim de realizar um levantamento com sucesso, deve-se alcançar conformidades nos quesitos de taxa sinal e ruído, taxa de sinal e *clutter*, resolução lateral e em profundidade do alvo de estudo (DANIELS, 2004).

6.2.1 Caracterização e elementos do sistema

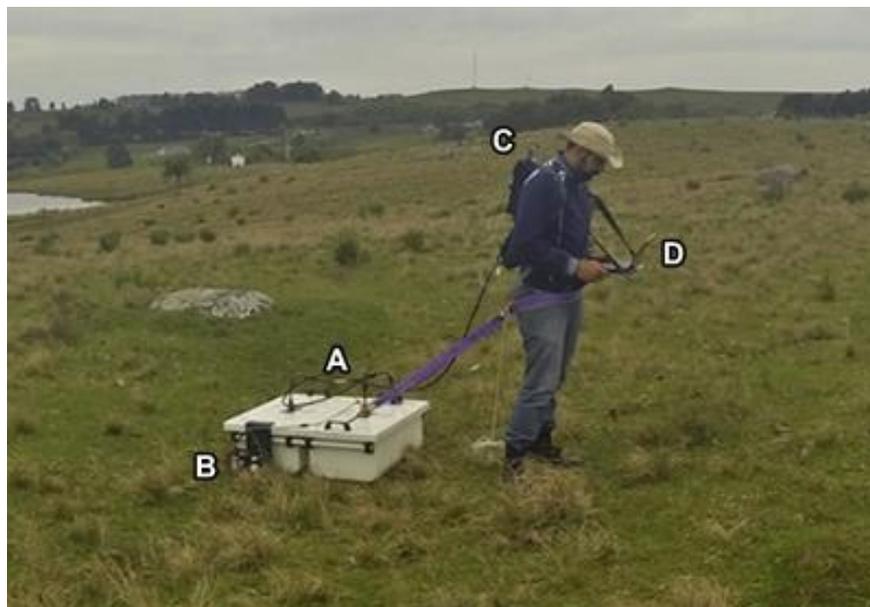
Como demonstrado na figura 12, o sistema de GPR é basicamente simples. Sendo composto por um par de antenas (A, antena transmissora e antena receptora), odometro (B), central do sistema (C) na qual é responsável pela emissão e transmissão do sinal, e computador portátil (D) para apresentação dos resultados em campo em tempo real e controle de parâmetros de aquisição. A caracterização de um sistema de radar é uma tarefa complexa devido a existência de vários fatores que influenciam a operação e uso do sistema. Os principais fatores que governam a caracterização de um sistema de GPR são (DANIELS, 2004):

- Método de captura do domínio do sinal;
- Processamento do sinal;
- Performance/desempenho;
- Frequência central empregada e a largura de banda usada;
- Configuração das antenas;
- Portabilidade;
- Confiabilidade.

O aspecto chave para medidas de GPR está na criação de um sinal controlado, não apenas em frequência, mas também em termos de polarização e direção do sinal emitido. O objetivo das medidas é caracterizar os componentes do campo

eletromagnético com medidas de uma ou mais componentes do campo elétrico ou magnético refletido ou espalhado.

Figura 12 - sistema de GPR com antenas blindadas de 80 MHz.



Fonte: Autor.

6.2.2 Alcance das frequências e performance do sistema de GPR

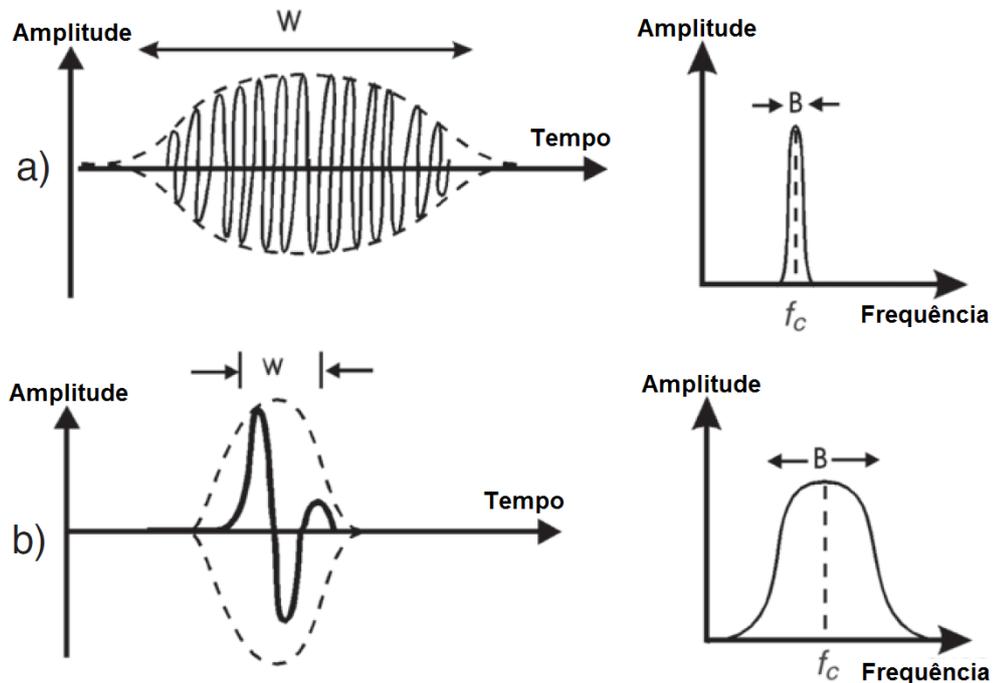
Uma estima inicial do alcance da performance do radar em profundidade pode ser feita considerando os seguintes fatores: caminhos de perda, refletividade do alvo, *clutter* e o alcance da dinâmica do sistema, havendo diferenças nos vários modelos de levantamento de dados. A resolução espacial do radar pode ser determinada considerando as resoluções laterais e verticais separadamente (DANIELS, 2004).

A maioria dos sistemas de GPR são usados no domínio do tempo, sendo enviado um pulso e recebido o sinal refletido na antena receptora. Contudo, as aplicações com domínio da frequência como o sistema FMCW (*Frequency Modulated Continuous Wave*) e o caminhamento com frequência, nos últimos anos, a medida que os preços dos equipamentos diminuem, podem ser esperados que aquisições geofísicas com estes esquemas e sistemas sejam superiores pois suas dinâmicas de aquisição e alcance podem ser melhores que sistemas com domínio do tempo (Daniels 2004).

A resolução espacial desejada irá determinar a largura de banda do instrumento de GPR mas não o alcance ideal para frequência. As condições da largura

e banda podem ser realizadas com a modulação da onda senoidal aplicada. A largura de banda de frequência do sinal é muito menor comparado a frequência da onda senoidal. Este tipo de sinal é normalmente tratado como um pulso contínuo de onda. Um sinal contínuo de uma onda senoidal é ligado e desligado na figura 13a. O outro extremo é o ultra pulso monocíclico de comprimento de banda. Neste caso, essencialmente um único ciclo senoidal de onda é o sinal e a largura de banda da frequência é igual, como na figura 13b.

Figura 13 - (a) um sinal de largura de banda curta possui um longo pulso oscilatório caracterizado pela frequência central dominante única (f_c). (b) um sinal com banda larga possui pouca oscilação, duração curta de tempo, e um amplo conteúdo de frequência na qual pode ser, com dificuldade, centrada e considerada com conteúdo único de frequência central (f_c ; ANNAN, 2005).



Fonte: Modificado de Annan, 2005.

Atenuação aumenta à medida que a frequência aumenta. A atenuação em materiais naturais é uma combinação de perdas elétricas e perdas por espalhamento do sinal, ambas das quais aumentam com o aumento da frequência. Quanto menor a frequência, maior a probabilidade de obter-se um sinal de penetração no meio. Sinais de GPR são frequentemente caracterizados pela razão entre a largura de banda (B) e a frequência central, f_c (ANNAN, 2005).

$$R = \frac{B}{f_c}$$

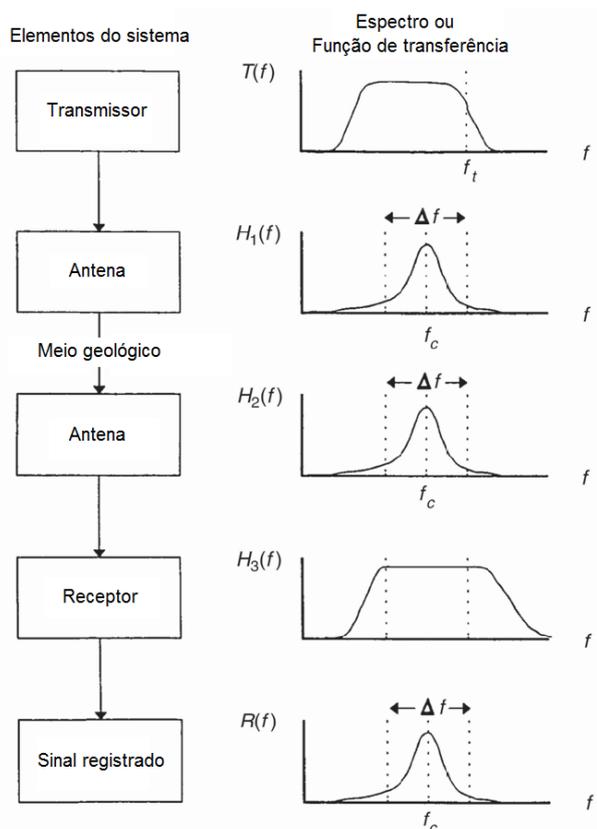
Eq (30)

6.2.3 Frequência central e largura de banda

Frequência e largura de banda são ligadas diretamente em um sistema de GPR. A frequência operadora de um sistema de GPR é usualmente dada pela indicação da frequência central de sua banda de operação. O fator associado é a largura de banda, ou o alcance da frequência, através do poder disponível pelo radar para sondar o solo. A largura de banda e a frequência central do sistema de radar são determinados por várias componentes do sistema. Primeiramente, antenas. A figura 14 ilustra como a variação de componentes do sistema determinam a frequência de operação e a largura de banda usadas (ANNAN, 2005).

A frequência central do sistema de radar possui um impacto muito grande na profundidade de investigação. A medida que a frequência diminui, a atenuação do sinal no meio diminui, a energia emitida aumenta, e o impacto de *clutter* mascara o sinal desejado (ANNAN, 2005).

Figura 14 - Fluxo de sinal simplificado através de elementos do sistema de GPR descritos por fatores de controle de frequência central e largura de banda.



6.2.4 Critério de amostragem e frequência de Nyquist

O objetivo de um levantamento de GPR é a obtenção de informações sobre a subsuperfície e possíveis estruturas internas utilizando ondas de rádio. O campo eletromagnético com uma função de espaço e tempo deve ser amostrado e registrado. A construção do sistema e *design* do modelo de levantamento deve seguir princípios fundamentais de amostragem. Para uma frequência senoidal f , a amostragem de tempo (Δt) e espaço (Δx) devem satisfazer as equações 31 e 32 (ANNAN, 2005).

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f} \quad \text{Eq (31)}$$

$$\Delta x \leq \frac{v}{2f} \quad \text{Eq (32)}$$

O intervalo de amostragem é controlado pelo conceito de amostragem de Nyquist. No qual dita que o intervalo de amostragem deve ser metade do período da frequência mais alta do sinal registrado. A frequência de Nyquist dita que os dados amostrados devem ser coletados a uma taxa de no mínimo $3f_c$. Desta forma, seguindo o critério de amostragem de Nyquist, para sinais transientes de GPR com largura de banda para uma frequência central de rádio utilizada, as equações 31 e 32 são modificadas. Obtendo-se as equações 33 e 34.

$$\Delta t \leq \frac{1}{3f_c} \quad \text{Eq (33)}$$

$$\Delta x \leq \frac{v}{3f_c} \quad \text{Eq (34)}$$

Os critérios anteriores são ideias para relações de amostragens de tempo e espaço no levantamento de GPR. Porém segundo JOL, o uso de valores que são metade dos valores é mais apropriado e deveriam estar implícitos nos critérios de todos os *designs* de levantamentos de GPR afim de obter-se uma melhor margem de confiabilidade, tendo assim as equações 35 e 36 (ANNAN, 2005).

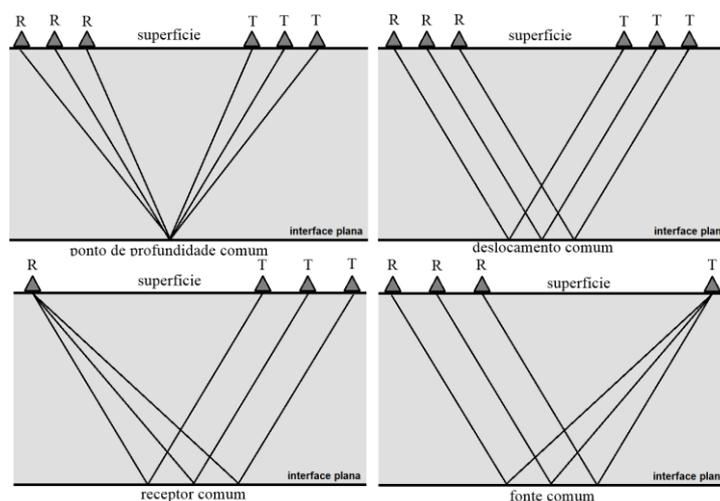
$$\Delta t \leq \frac{1}{6f_c} \quad \text{Eq (35)}$$

$$\Delta x \leq \frac{v}{6f_c} \quad \text{Eq (36)}$$

6.2.5 Arranjos e levantamentos

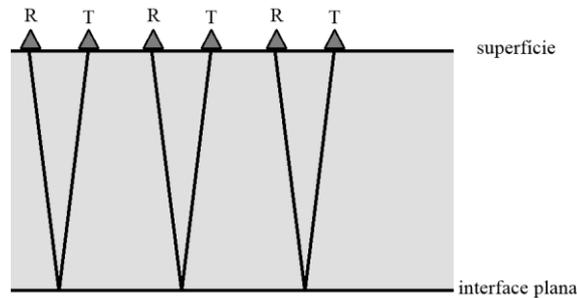
Normalmente em estudos e trabalhos geofísicos, os sistemas de aquisições de dados com uso de GPR são classificadas em 4 diferentes arranjos, ou modos, de disposição espacial das antenas receptora e transmissora na linha de estudo. Arranjos, estes, amplamente conhecidos na comunidade científica em suas versões na língua inglesa (figura 15): fonte comum (*common source*), receptor comum (*common receiver*), deslocamento comum (*common offset*) e ponto de profundidade comum (*common depth point – CDP*; DANIELS, 2004).

Figura 15 - Arranjos de aquisição geofísica com uso de GPR, diferentes posicionamentos de antenas transmissoras (T) e receptores (R).



Fonte: Modificado de Daniels, 2004.

O arranjo de espalhamento comum, *common offset*, é o modelo mais utilizado em estudos e trabalhos geofísicos com GPR, conhecido como *common offset profiling* (figura 16). Neste arranjo a distância entre antena transmissora e receptora é fixa no decorrer de todo o levantamento de dados. Arranjos de ponto de profundidade comum, receptor e fonte (transmissor) comum são utilizados em estudos e trabalhos na indústria, porém exigem uma abordagem diferente no processamento do sinal (DANIELS, 2004).

Figura 16 - *common offset profiling*.

Fonte: Modificado de Daniels, 2004.

Na tabela 1, Daniels (2004) demonstra a relação entre os parâmetros de profundidade do alvo de estudo, duração do pulso do sinal, frequência central usada nas antenas e a resolução em profundidade.

Tabela 1 - Parâmetros do equipamento e relações em profundidade.

Profundidade do alvo (m) ^a	Duração do pulso (ns) ^b	Frequência da antena (MHz) ^c	Resolução em profundidade (m) ^d
< 0,25	0.5	2000	0.025
< 0,5	1	1000	0.05
< 1	2	500	0.1
< 2	4	250	0.2
< 4	8	125	0.4
< 8	16	62.5	0.8
< 16	32	31.25	1.6

^a Profundidade em um meio com atenuação de < 20 dB.m⁻¹.

^b Duração de pulso para a metade da largura do pico de energia principal.

^c Assume que o pulso transmitido está na forma geral de *Rayleigh wavelet*.

^d Assume materiais com permissividade igual a 9.

Fonte: DANIELS, 2004.

6.3 GPR em estudos do solo

Solos são naturalmente corpos tridimensionais constituídos por minerais inconsolidados e matéria orgânica, nos quais formam uma cobertura contínua sobre a superfície do planeta em sua grande parte. Em todos parâmetros de medidas do solo,

apresentam resultados extremamente complexos e variáveis em relações biológicas, químicas, físicas, mineralógicas e em propriedades eletromagnéticas. Estas propriedades influenciam na propagação da velocidade, atenuação e penetração do sinal eletromagnético, desta forma influenciando diretamente na performance do levantamento de dados com uso de GPR (JOL, 2009).

A resolução e profundidade de investigação do GPR são determinados pela frequência central e pelas propriedades elétricas dos materiais terrestres (DANIELS, 2004; OLHOEFT, 1993). Devido a altas taxas de atenuação do sinal, as profundidades de investigação são fortemente diminuídas em solos que possuem alta condutividade elétrica. As condutividades elétricas dos solos aumentam com o aumento de água, sais dissolvidos e conteúdo de argila (MCNEILL, 1980). Estas propriedades dos solos determinam a carga elétrica transportada e armazenada no solo (OLHOEFT, 1993). Em estudos de solos, as perdas de energia mais significantes são devido ao transporte de carga iônica em subsolo e processos eletroquímicos associados com cátions presentes em argilominerais (NEAL, 2004). Tais perdas influenciam seriamente na performance do GPR (OLHOEFT, 1993).

A condutividade elétrica está diretamente relacionada a quantidade, distribuição, química e estado físico (líquida, sólida e gasosa) da água presente no solo (MCNEILL, 1980). Condutividade elétrica, permissividade dielétrica e energia de dissipação aumentam com o aumento do conteúdo de água no solo (DANIELS, 2004).

A água possui uma estrutura molecular polar. Quando aplicado um campo elétrico alternado no solo, as moléculas da água experimentam uma força que alinha seus momentos de dipolo permanente paralelamente à direção do campo elétrico aplicado (DANIELS, 2004). Processos polarizadores resultam em armazenagem, geralmente muito baixas, de energia do campo elétrico. Em frequências acima de 500 MHz, a absorção da energia pela água é a principal perda de sinal em estudos de solos (DANIELS, 2004). Mesmo em ambientes muito seco, a água capilar retida no solo é suficiente para influenciar na condutividade elétrica e perdas de energia do sinal. A condutividade elétrica e as perdas de energia são também afetadas pelo montante de sais em solução no solo (CURTIS, 2001). Todas as soluções presentes nos solos contêm sais, nos quais aumentam a condutividade eletrolítica. Em geral, sais solúveis são mais lixiviados em grandes quantidades em solos de regiões húmidas, do que em regiões áridas e semiáridas. Em regiões áridas e semiáridas sais solúveis como o potássio, sódio e carbonatos de cálcio e magnésio (menos solúveis)

são mais propícios a acumulação em camadas próximas a superfície do solo. Devido à alta condutividade elétrica dos sais, solos muito salinos, nos quais possuem condutividade elétrica maior que 0,4 Siemens por metro, são considerados inapropriados para a grande maioria das aplicações de GPR. Nestes solos a penetração do sinal de GPR fica restrito a profundidade, igual ou menor, de 25 cm (JOL, 2009).

A aplicação da tecnologia do GPR em estudos de solo iniciou nos Estados Unidos da América no estado da Flórida pelos pesquisadores R. Benson e R. Glaccum em 1979 e reportado por Johnson *et al* (1980, p. 68 a 72) com resultados satisfatórios para identificações de características do solo como horizontes argilosos e profundidade do nível freático. Resultados satisfatórios utilizando GPR em análises de solo com finalidades agrárias também foi documentado por Collins e Doolittle (1987, p. 491 a 493) quando reportou uma diminuição de custo de 70% e um aumento de 210% na produtividade do levantamento comparando o levantamento de GPR realizado em perfis transversais em relação a métodos tradicionais de amostragem de solo. Portanto, em 1981 o GPR foi incorporado no programa de pesquisa de solo da Flórida, assim como em outros grupos de pesquisas de solo nos Estados Unidos da América como uma ferramenta de rotina em investigações de características do solo (ALLRED *et al.*, 2008, p. 46).

O GPR é principalmente utilizado por pesquisadores de solos como ferramenta de controle de qualidade do solo para verificar a composição taxonômica do mesmo, documentar a presença e profundidade de horizontes e características do solo, e observar informações espacial e temporal de mudanças das propriedades físicas do solo. Levantamentos de GPR em estudos de solo tipicamente são realizados com intervalos entre antenas de 0,5 a 15 metros, com frequências centrais entre 100 e 500 MHz. Tipicamente, antenas com altas frequências centrais (400 a 500 MHz) apresentam resultados mais satisfatórios para solos relativamente secos e eletricamente resistivos. Para solos orgânicos e agricultáveis, onde é necessária uma boa penetração do sinal, antenas de baixa frequência central (70 a 200 MHz) são comumente utilizadas com resultados satisfatórios (DANIELS, 2004; JOL, 2009).

Sucre *et al* (2011) utilizou o GPR como método indireto e trado mecânico como método de amostragem direta da profundidade do solo em uma região florestal montanhosa nos limites das Montanhas Apalaches no sul dos Estados Unidos da América, sendo utilizadas antenas de 200 e 400 MHz para estimar a espessura do

solo, obtendo valores de espessura para o solo de 0,88m enquanto com uso do trado os valores para profundida foram de 0,53 m. Diferente do trado no qual apresenta medidas pontuais, o GPR fora capaz de delimitar lateralmente a profundidade do solo em perfis transversais, provando assim ser uma ótima ferramenta na análise de espessura do solo em ralação a métodos tradicionais.

A grande parte de todos as pesquisas já realizadas e citadas no que se refere a estudos e pesquisa de solo com uso de GPR têm sido feito pelos profissionais do Departamento de Agricultura do Estados Unidos da América (*United States Department of Agricultura – USDA*). Sendo reportados os sucessos da aplicação de GRP para mapear: o nível freático; embasamento rochoso, nível de saturação capilar; compactação e variações de textura no solo assim como conteúdo de matéria orgânica, umidade, movimento de plumas de água e contaminantes através do solo e mapear a extensão lateral e estimar a profundidade e espessura para horizontes do solo e camadas geológicas (ALLRED et al., 2008).

A tabela 2 demonstra os valores e intervalos encontrados nas literaturas clássicas para estudos de GPR com os valores para condutividade elétrica (σ) e a constante dielétrica dos materiais (k).

Tabela 2 – Intervalos de valores para velocidade da onda eletromagnética no meio (v), constante dielétrica (k) e a condutividade elétrica (σ) de alguns materiais para antenas de 80 a 120 MHz.

Material	Velocidade (m.ns⁻¹)	k	σ (mS.m⁻¹)
Ar	0,30	1	0
Areia	0,10 – 0,20	2,55 – 7,50	0,01
Areia e cascalho	0,09 – 0,13	3,50 – 6,50	0,007 – 0,06
Areia saturada e cascalho	0,06 – 0,08	15,5 – 17,5	0,700 – 9,00
Solo arenoso	0,15 – 0,12	4,00 – 6,00	0,14
Solo arenoso saturado	0,05 – 0,08	15,0 – 30,0	6,90
Solo argiloso	0,15 – 0,12	4,00 – 6,00	0,27
Solo argiloso saturado	0,09 – 0,07	10,0 – 15,0	50,0
Granito	0,12 – 0,13	4,00 – 6,00	0,01

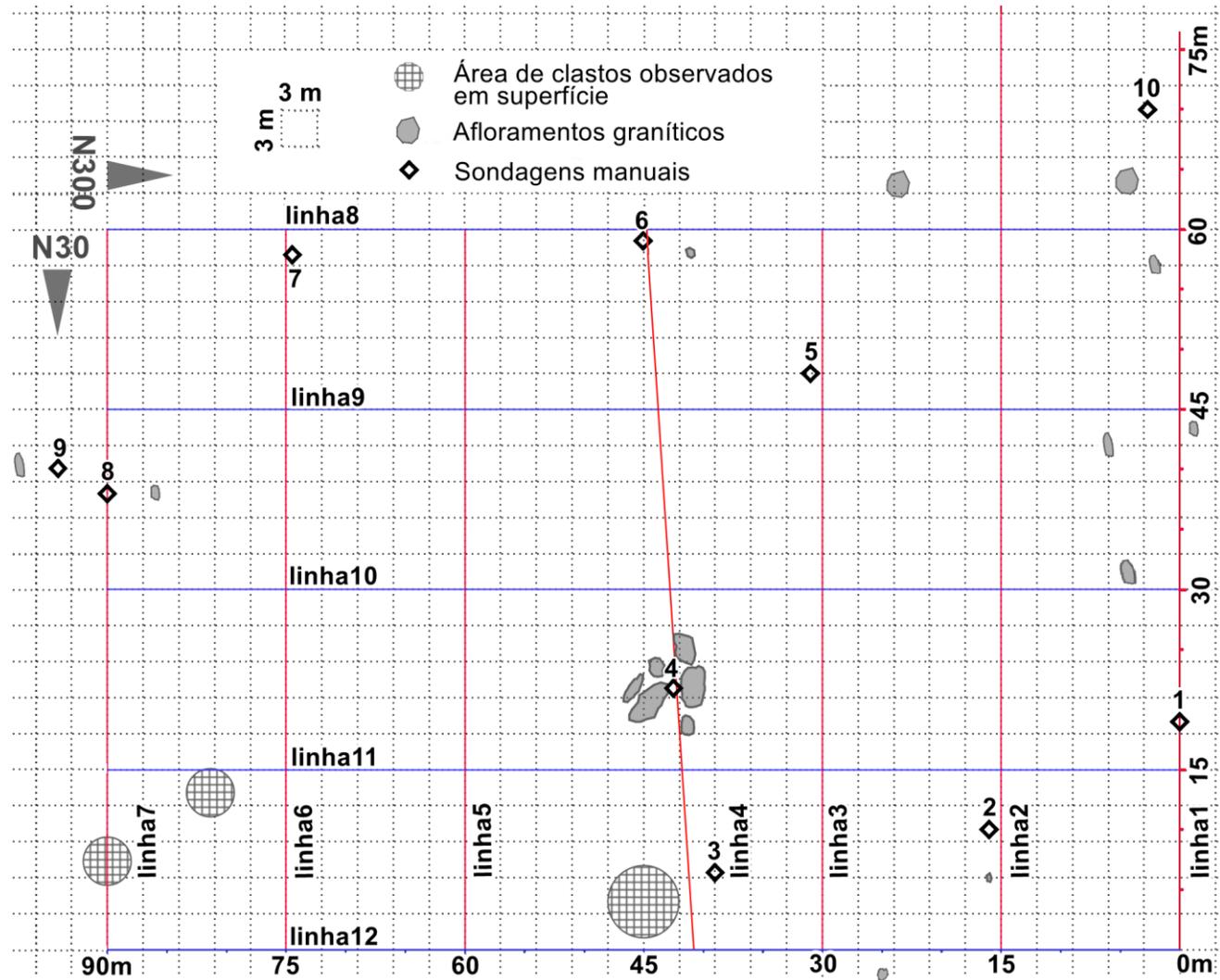
Fonte: Modificado de ALLRED et al., 2008.

7 Levantamento Geofísico de Campo

Para posicionamento geográfico das linhas, primeiramente foi utilizado um GPS de mão para aquisição de um extremo da malha dos perfis de GPR, ponto zero/zero. As direções dos perfis foram alinhados com bússola e os comprimentos dos perfis foram registrados pelo odometro do sistema de GPR para manter-se uma maior acurácia.

O croqui de campo (Figura 17) apresenta a localização das sondagens, orientações dos perfis de GPR e anotações de campo relevantes às interpretações. Os parâmetros da aquisição dos dados de GPR para aquisição dos perfis de GPR foram estabelecidos de acordo com as relações de resolução de amostragem de Nyquist e testados em campo durante a aquisição para a realidade do meio geológico estudado. Os parâmetros utilizados são apresentados na tabela 3.

Figura 17 – Anotações de campo, dimensões da área de estudo, direções das linhas e a disposição espacial dos perfis de GPR.



Fonte: Autor.

Tabela 3 – Parâmetros operacionais para aquisição dos perfis de GPR.

Frequência central da antena (MHz)	Espaçamento entre traços (m)	Espaçamento entre antenas (m)	Amostragem por traço	Time Window (ns)
80	0,048	0,45	512	400

Fonte: Autor.

8 Resultados

Foram obtidos 906 metros de dados de GPR em perfil com antenas blindadas de 80 MHz e 10 sondagens. Embora não recomendado para estudos próximo a superfície, as antenas de 80 MHz demonstraram eficiência em mensurar lateralmente refletores a profundidades inferiores a 1 m, sendo comprovado com sondagens diretas.

8.1 Sondagens

As sondagens foram realizadas com cavadeira articulada e trado, ambos manuais. A sondagem com a cavadeira articulada, embora com menor profundidade de investigação, foi de extrema importância para auxiliar nas análises qualitativas de propriedades e aspectos do solo como umidade, textura, cor, matéria orgânica (Figura 18) e fragmentos de rocha (Figura 19). Em contrapartida, a sondagem com o trado possui uma profundidade de investigação maior (máximo de 1,62 m) mas apresenta menor testemunho de sondagem. Uma vez que o trado utilizado foi o do tipo rosca, onde tem-se amostra do solo apenas nos 0,21 m mais profundos na investigação (Figura 20). Por este motivo, nas sondagens 1, 5 e 6 há lacunas denominadas de “solo não classificado” devido não se ter amostras diretas do solo para sua classificação.

Os resultados e descrições de cada sondagem esta apresentado na tabela 4, na qual serviu de base para criação de perfis de sondagens demonstrados na figura 21.

Figura 18 – Sondagem com cavadeira manual, profundidade de 0,30 m na sondagem 8.



Fonte: Autor.

Figura 19 – Clasto granítico coletado na profundidade de 0,44 m na sondagem 6.



Fonte: Autor.

Figura 20 – Solo amostrado com trado na sondagem 6.



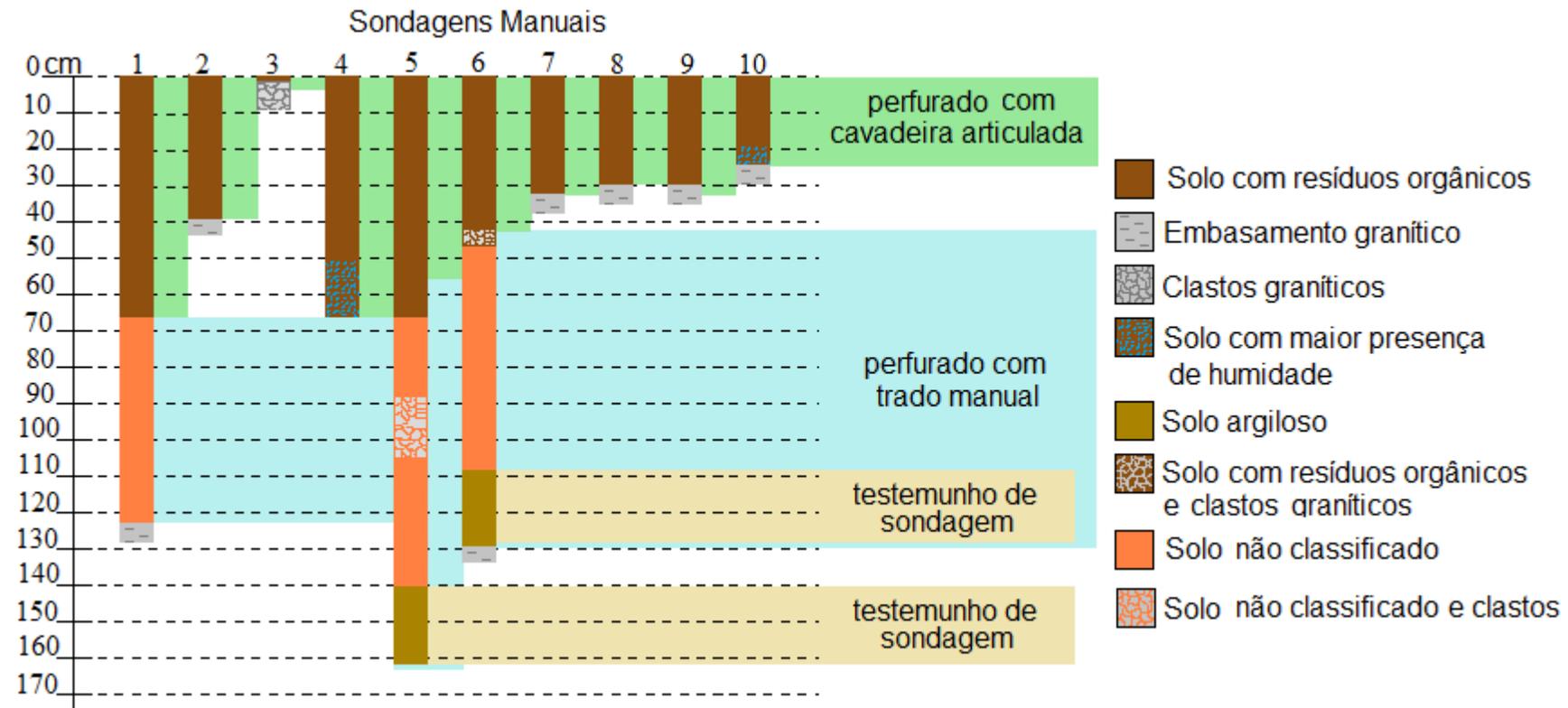
Fonte: Autor.

Tabela 4 – Parâmetros das sondagens.

Número da Sondagem	Profundidade da Sondagem (m)	Linha Próxima	Descrições
1	1,28	Linha 1	Embasamento rochoso a 1,28 m.
2	0,39	Linha 2	Embasamento rochoso a 0,39 m.
3	0,10	Linha 4	0,03 m, interface solo com resíduos orgânicos e clastos graníticos.
4	0,65	Linha 4	Ao centro do agrupamento de matacões mais significantes da área. 0 a 0,5 m, solo com resíduos orgânicos com baixa umidade. 0,5 a 0,65 m solo com teor de umidade alto.
5	1,62	Linha 3	0 a 0,88 m solo com resíduos orgânicos. 0,88 m início de complicações com a sondagem (meio rígido) e início de sonoridade característica do contraste solo e clastos. 1,05 m fim de sonoridade do contraste solo e clastos e perfuração retomada com mais facilidade (meio menos rígido) até o alcance máximo do trado manual (1,62 m). Testemunho de sondagem: Solo com textura média argilosa e cor clara, extremamente semelhante ao testemunho da sondagem 6.
6	1,27	Linha 4	0 a 0,43 m solo com resíduos orgânicos. 0,43 a 0,44 m solo com resíduos orgânicos e clastos grafíticos (Figura 31). 0,44 a 1,05 m solo indefinido. 1,05 a 1,26 m solo argiloso. 1,27 m embasamento granítico. Testemunho de sondagem: Solo com textura média argilosa e de cor clara (Figura 32).
7	0,33	Linha 6	0 a 0,33 m, solo com resíduos orgânicos. Embasamento granítico a 0,33 m.
8	0,30	Linha 7	0 a 0,30 m, solo com resíduos orgânicos. Embasamento granítico a 0,30 m.
9	0,30	Linha 7	0 a 0,30 m, solo com resíduos orgânicos. Embasamento granítico a 0,30 m.
10	0,26	Linha 1	0 a 0,20 m, solo com resíduos orgânicos. 0,20 a 0,26 m solo com resíduos orgânicos com alta umidade. Embasamento granítico a 0,26 m.

Fonte: Autor.

Figura 21 – Perfis criados para cada sondagem.

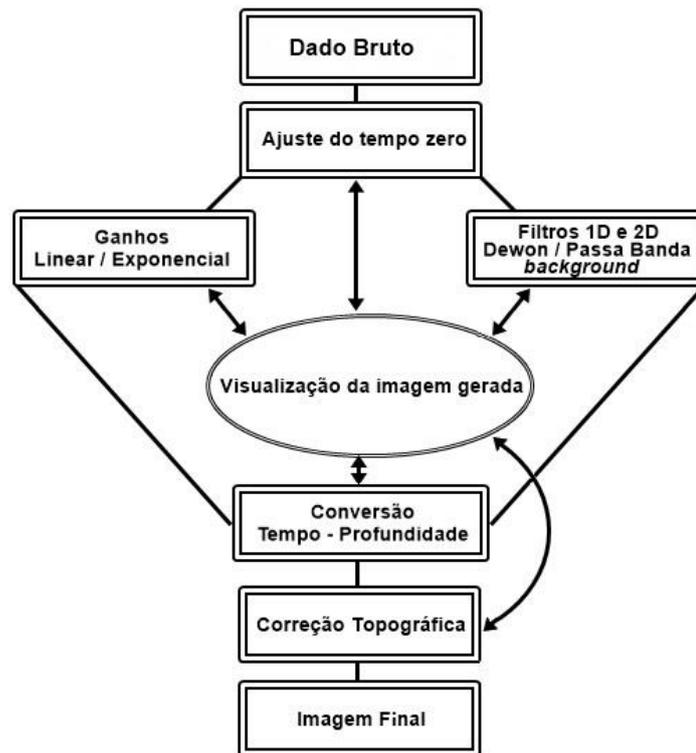


Fonte: Autor

8.2 GPR

A figura 22 apresenta um fluxograma básico das etapas de análise de dados de GPR.

Figura 22- Fluxograma de processamento básico para dados de GPR.



Fonte: Modificado de Borges, 2007.

Com intuito de realçar e eliminar frequências indesejadas nos radargramas e com a finalidade de aprimorar a imagem final para interpretações, foram aplicadas as operações descritas abaixo, sendo que as etapas de processamento são aplicadas de acordo com as características dos dados e dependem, fundamentalmente, do intérprete:

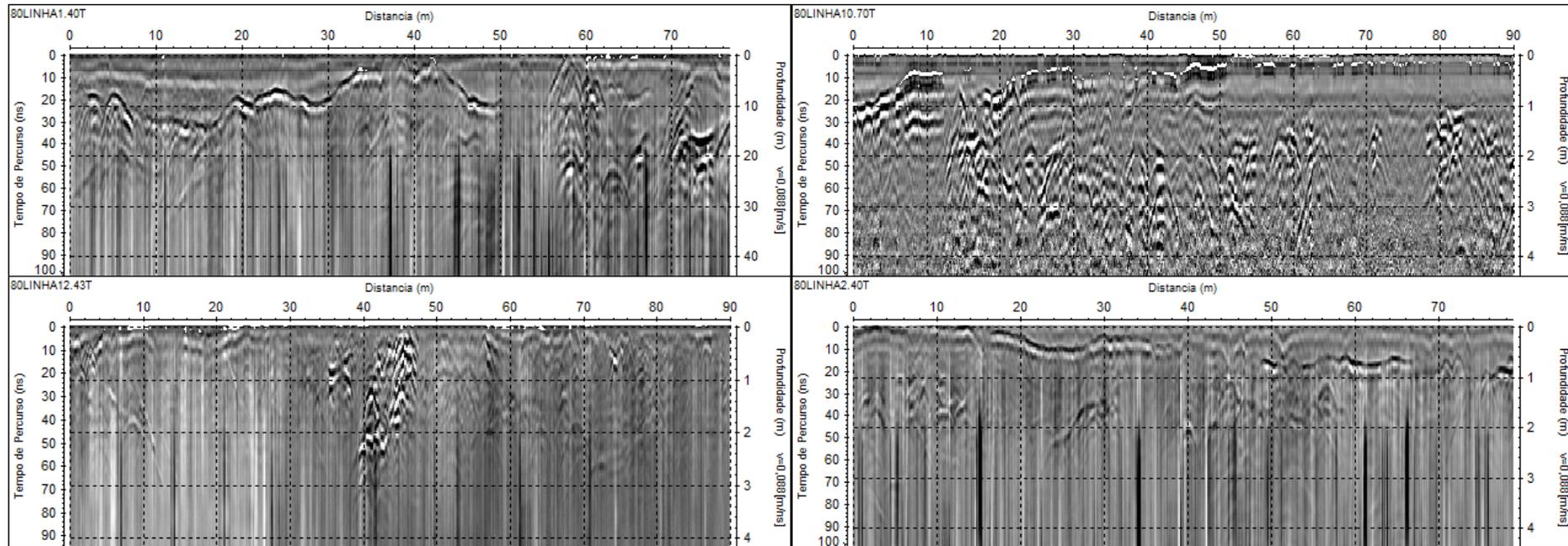
- *Ajuste do tempo zero (move start time)*: Define a disposição do tempo zero no radargrama; definido como 30ns eliminando as ondas aéreas, ondas diretas do solo e ondas refratadas.
- *Time cut*: define o tempo máximo da janela amostrada a ser descartada. Em todos os radargramas foram aplicados um *time cut* de 100 ns apesar

da janela de amostragem ser de 400 ns. Este filtro foi aplicado devido a ausência de refletores no radargrama partindo dos 100 ns.

- Filtros 1D:
 - DEWOW (*Subtract-mean*): Remoção de ruídos de baixa frequência no sinal do radar causados por indução eletromagnética.
- Filtros 2D:
 - Remoção do Ruído de Fundo (*Background Remove*): elimina ruídos horizontais de baixa frequência, tal como reverberações da onda eletromagnética nas camadas.
- Ganhos:
 - AGC: funções nas quais aumentam a amplitude de reflexões de baixa intensidade e auxiliam na visualização de artefatos nos quais não estavam amostra no radargrama. Aplicado ganho automático.
 - *Energy Decay*: Gera uma curva de decaimento de energia aplicada para traçar os dados. Quando aplicado, uma curva de ganho na direção y (tempo) é aplicada no perfil completo com base na curva de decaimento da amplitude média calculada entre os traços.

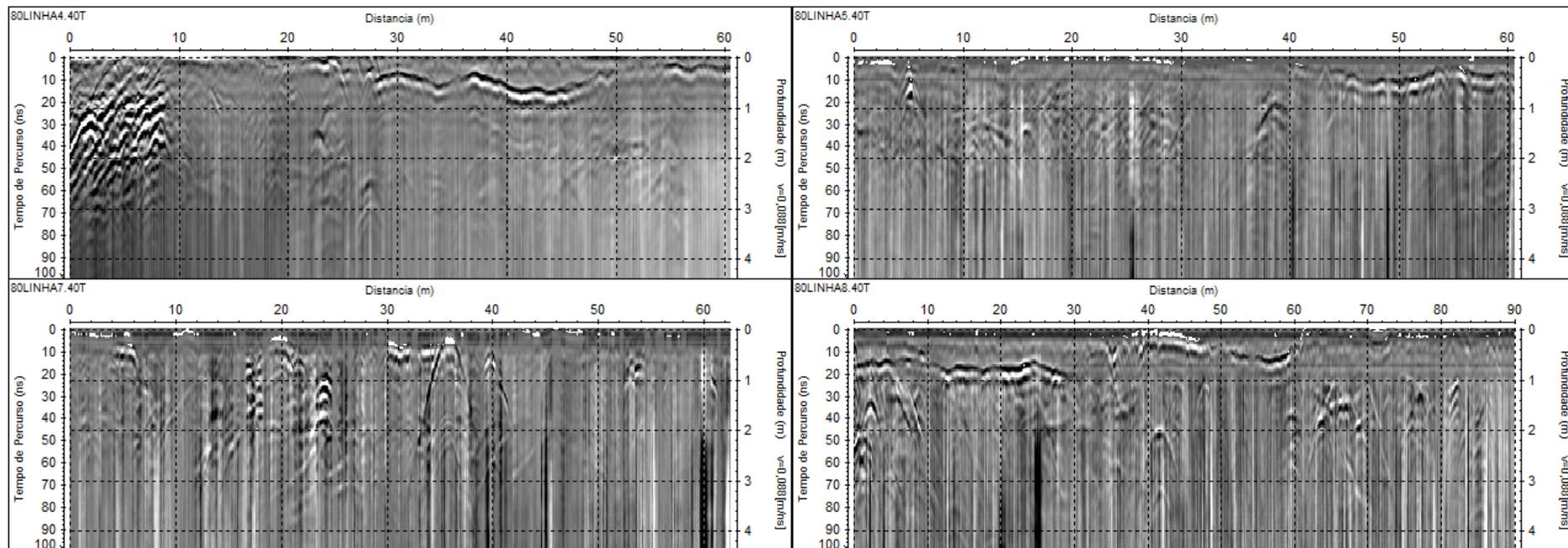
A rotina de processamento assim quanto os valores dos parâmetros utilizados nas filtragens e ganhos foram exclusivamente destinados a realçar refletores laterais nos quais caracterizavam o contraste entre solo e rocha. Há refletores próximos aos 100 ns e até mesmo além, alguns atingindo os 200 ns (dentro da janela de amostra de 400 ns). Porém estes não foram levados em consideração pois tratavam-se de refletores oriundos do contraste de impedância eletromagnética dentro da própria rocha granítica. Caso os objetivos sejam a visualização e análise de refletores dentro do granito, tais quais caracterizariam a disposição física das fraturas, uma nova rotina de processamento deveria ser empregada afim de realçar estes refletores mais profundos. Embora o fluxo de processamento não foi alterado no processamento individual para cada perfil, alguns ajustes nos parâmetros de cada processo fora necessário para melhor visualização de refletores em subsuperfície. Após processados os perfis obteve-se as figuras 2D 23 a 25 e as 3D 26 a 28.

Figura 23 – radargramas processados das linhas 1, 10, 12, 2.



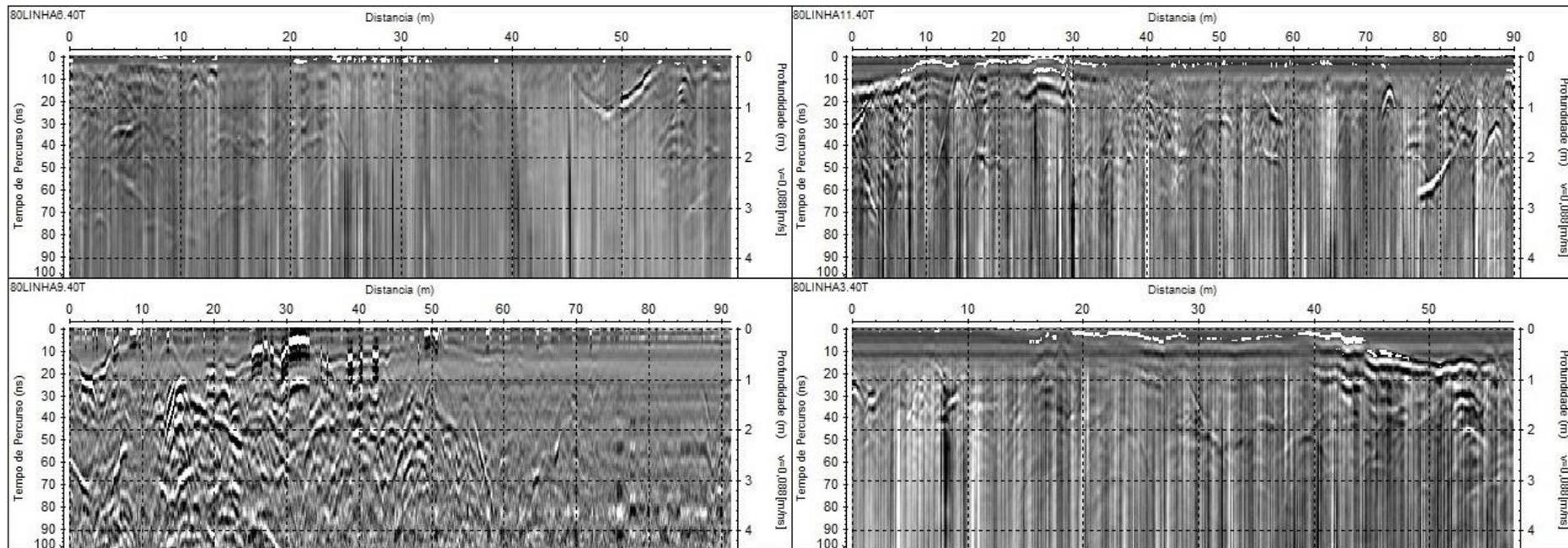
Fonte: Autor.

Figura 24 – radargramas processados das linhas 4, 5, 7 e 8.



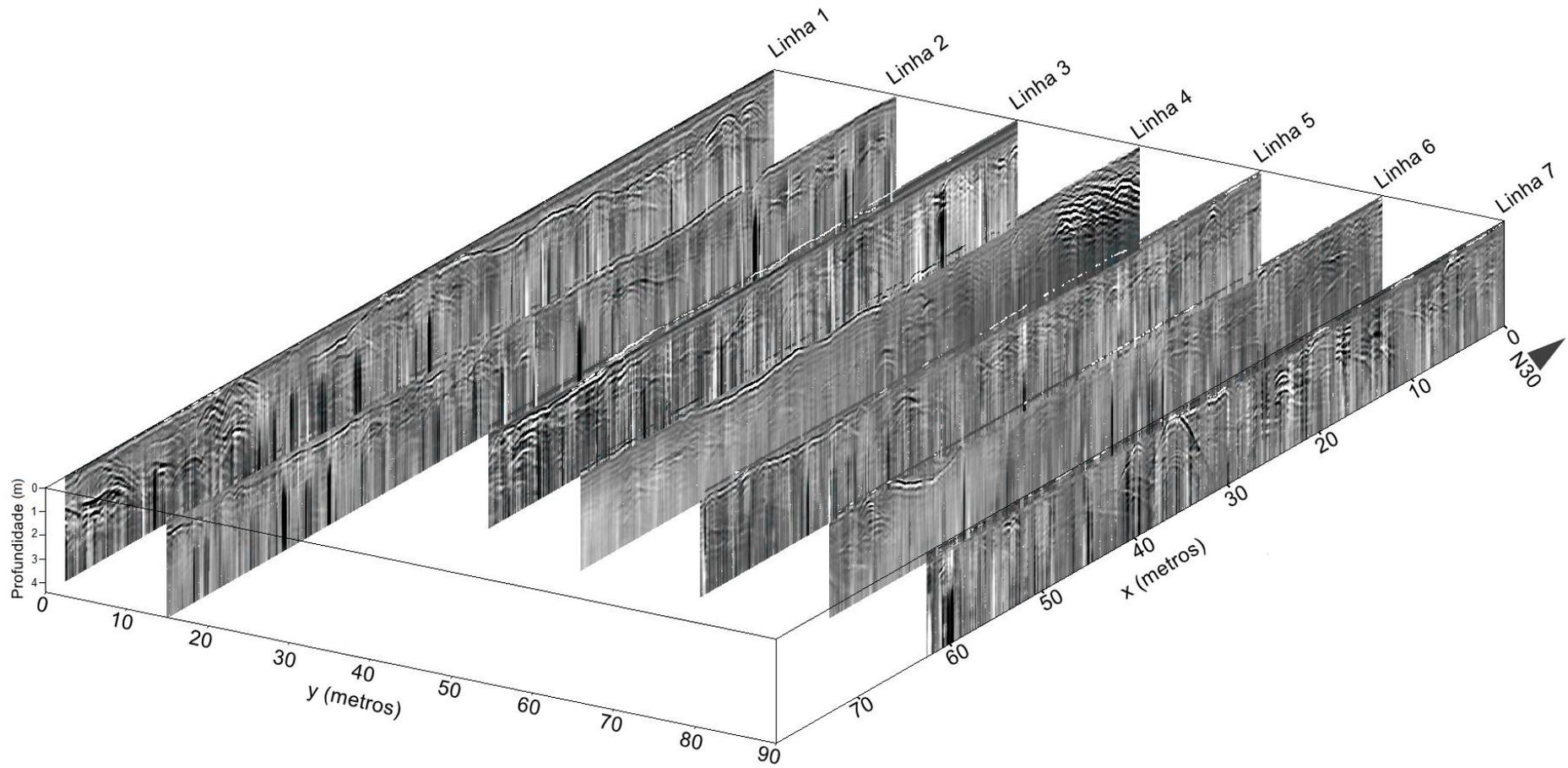
Fonte: Autor.

Figura 25 – radargramas processados das linhas 6, 9, 11 e 3.



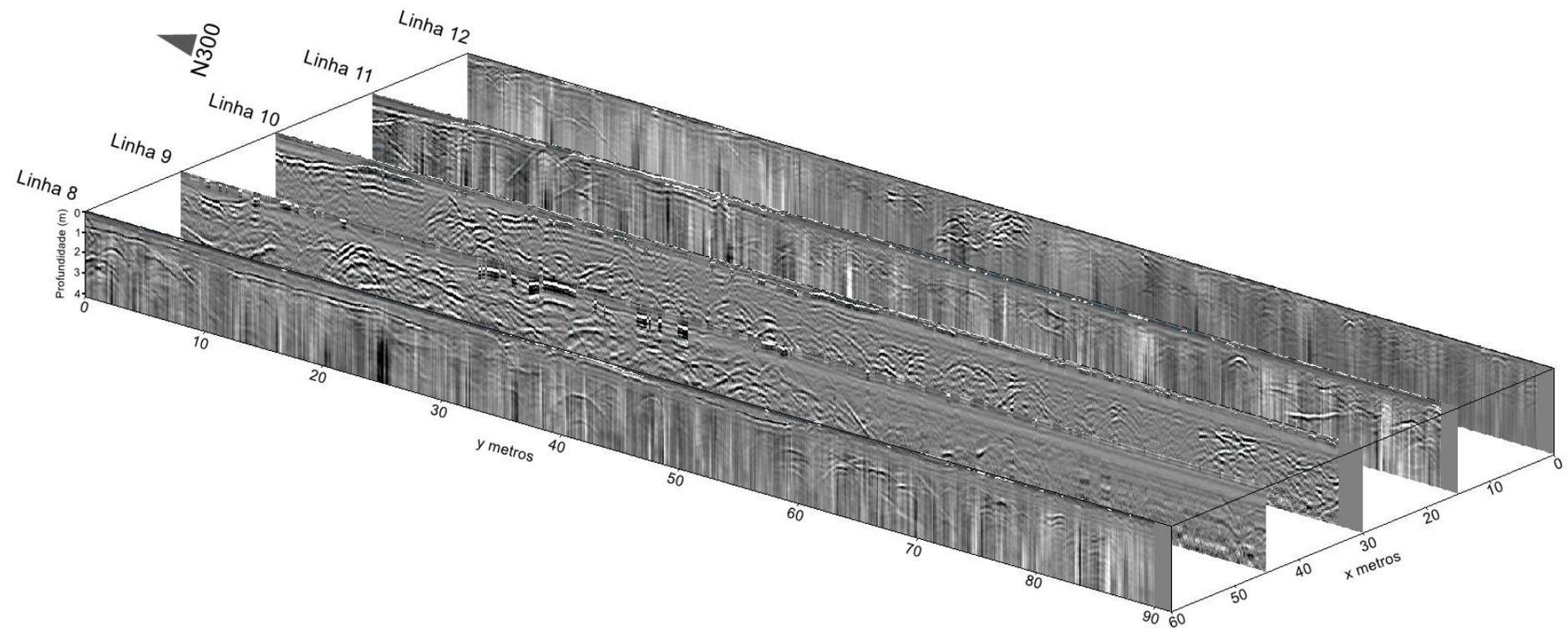
Fonte: Autor.

Figura 26 – radargramas processados com lineamento N30.



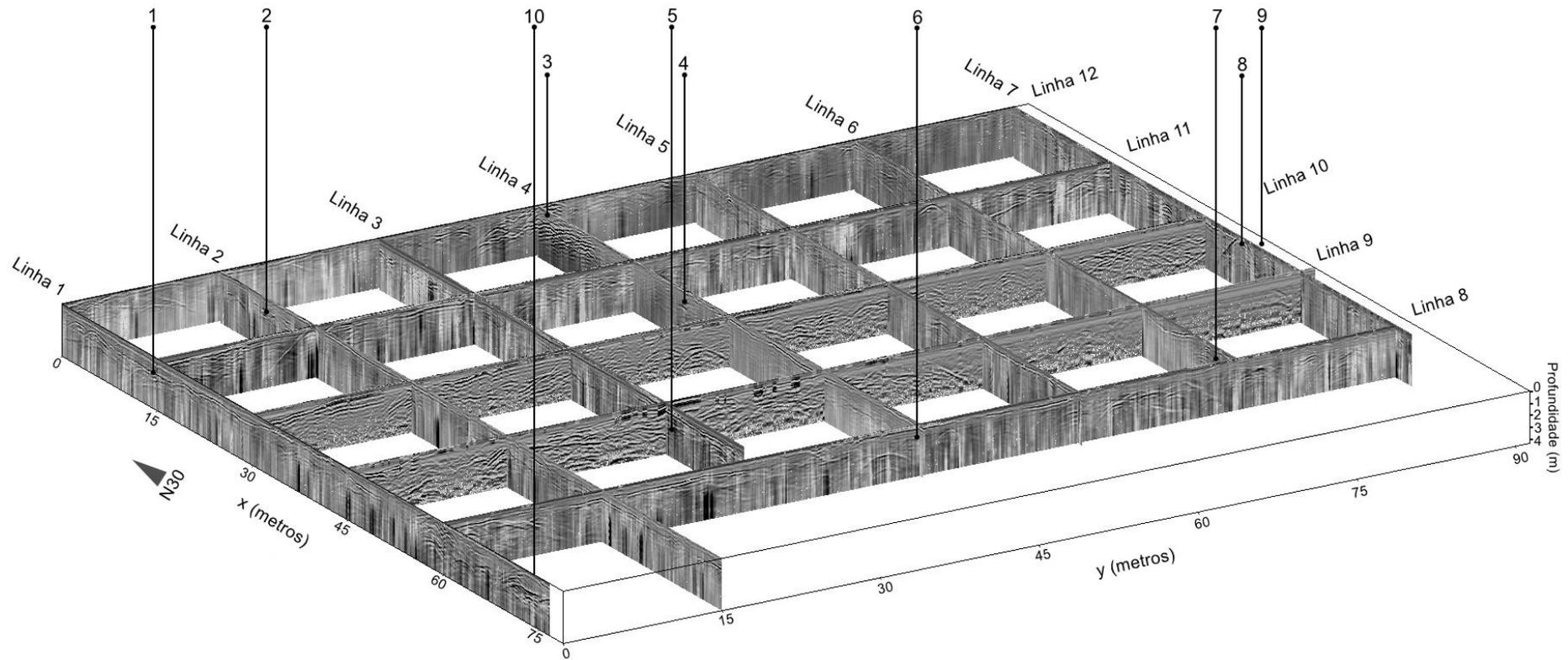
Fonte: Autor.

Figura 27 – radargramas processados com lineamento N300.



Fonte: Autor.

Figura 28 – modelo 3D para todas as linhas com o posicionamento das sondagens.

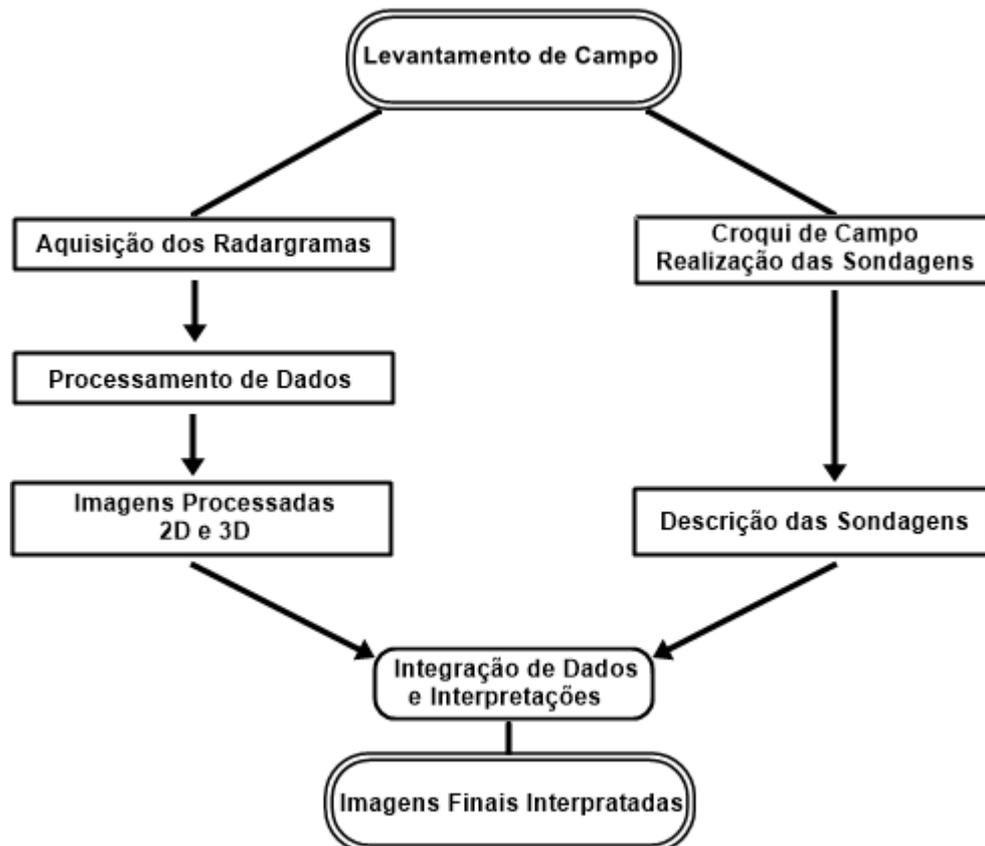


Fonte: Autor.

8.3 Integração dos resultados de GPR e Sondagens

A figura 29 demonstra o fluxograma de como ocorreu a integração dos dados e análises conjuntas.

Figura 29 – Fluxograma das etapas das integrações de dados das sondagens e dos radargramas.



Fonte: Autor.

Ao integrar os resultados das análises de sondagem e da disposição dos refletores lateralmente e em profundidade foi possível calcular a velocidade da onda eletromagnética para a camada de solo com o uso da equação 37, sendo utilizado os valores apresentados na tabela 5.

$$v = \frac{2\Delta P}{\Delta t}$$

Eq (37)

Tabela 5 – Velocidade e parâmetros utilizados para cálculo da velocidade da onda eletromagnética no solo.

Linha próxima	Número da sondagem	Profundidade (ΔP) Solo / Rocha (m)	Tempo de Percurso (Δt) observado no radargrama (ns)	Velocidade da camada do solo ($m.ns^{-1}$)
Linha 1	1	1,28	37	0,069189
Linha 1	10	0,26	6	0,086667
Linha 2	2	0,39	9	0,086667
Linha 4	6	1,27	30	0,084667
Linha 6	7	0,33	8	0,082500
Linha 7	8	0,30	6	0,100000
Linha 7	9	0,30	6	0,100000
Linha 8	6	0,33	26	0,097692
Linha 11	1	1,28	30	0,085334
Linha 12	2	0,39	9	0,086667
Media da Velocidade da camada de solo ($m.ns^{-1}$)				0,087938

Fonte: Autor.

Uma das propriedades mais importantes e influenciáveis em estudos de GPR é a constante dielétrica do meio. Uma vez estabelecida a velocidade de propagação da onda eletromagnética no ambiente estudado e com auxílio da equação 16, pode-se estima-la (assumindo $c_0=0,30 m.ns^{-1}$).

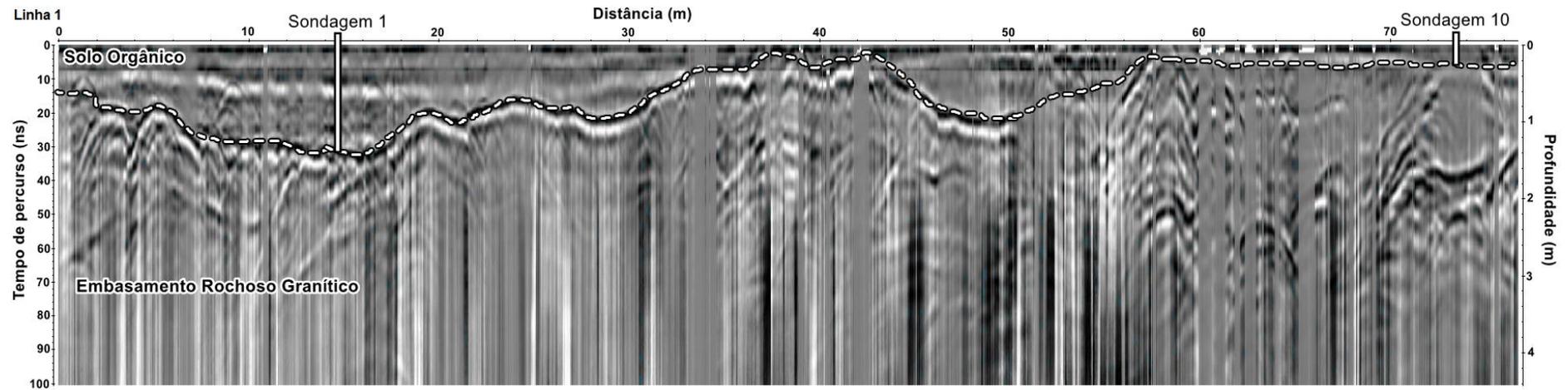
$$k = 11,64041$$

Sabendo a velocidade da onda eletromagnética no meio geológico, pode-se adicionar o valor desta ao fluxo de processamento dos radargramas. Aplicando no processo de conversão do tempo em profundidade (*timedepth conversion*) no qual foi utilizado o método de adaptação por hipérbolas, no radargrama interpretado da linha 7 (Figura 36, M).

Comumente em levantamentos de GPR as imagens finais (pós-processadas) são submetidas ao processo de correção topográfica. Porém, devido o objetivo do estudo estar em níveis de detalhamento maior do que os levantamentos topográficos presente da área. Preferiu-se manter as imagens finais sem a correção topográfica na qual não iria auxiliar de forma significativa em interpretações de profundidade dos refletores.

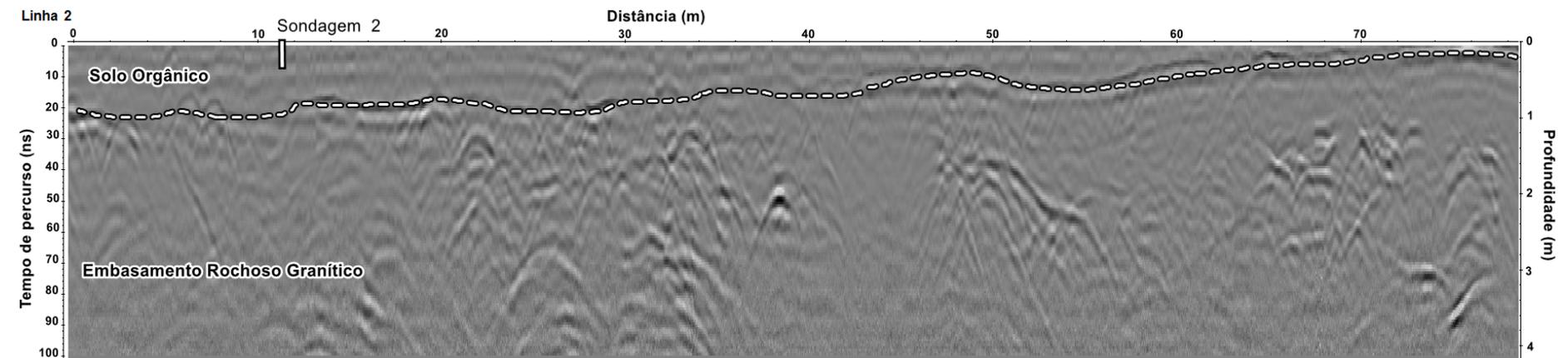
Os radargramas foram interpretados individualmente levando em correlação a continuação dos refletores dos perfis de radar mais próximo assim quanto a profundidade do contato solo e rocha granítica obtidos nas sondagens. Os radargramas interpretados estão apresentados nas figuras 30 ao 41.

Figura 30 – Radargrama interpretado, linha 1.



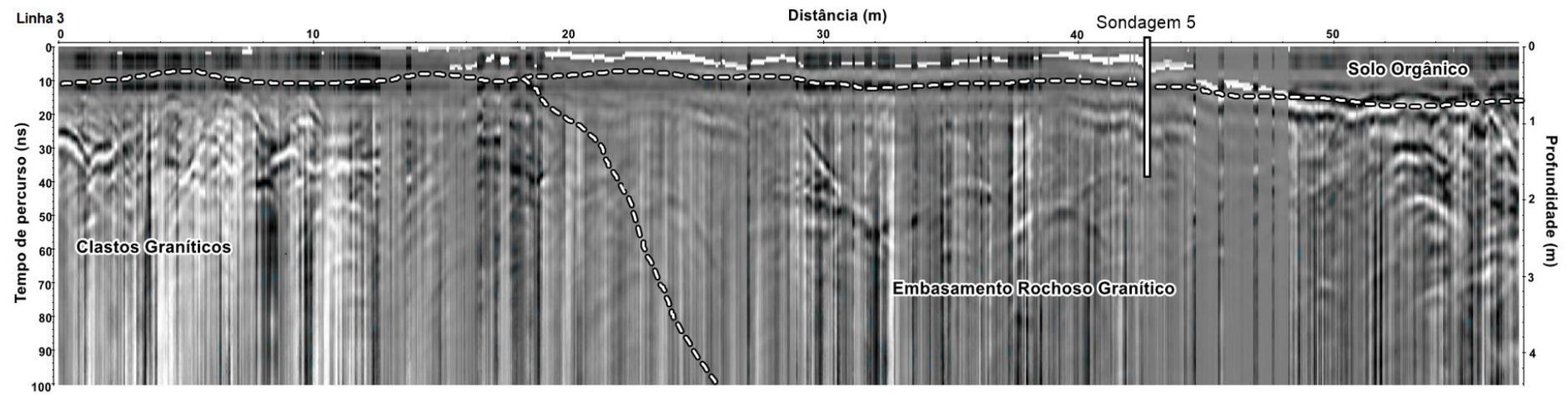
Fonte: Autor.

Figura 31 – Radargrama interpretado, linha 2. Sondagem obstruída não pelo embasamento rochoso, mas provavelmente por bloco granítico.



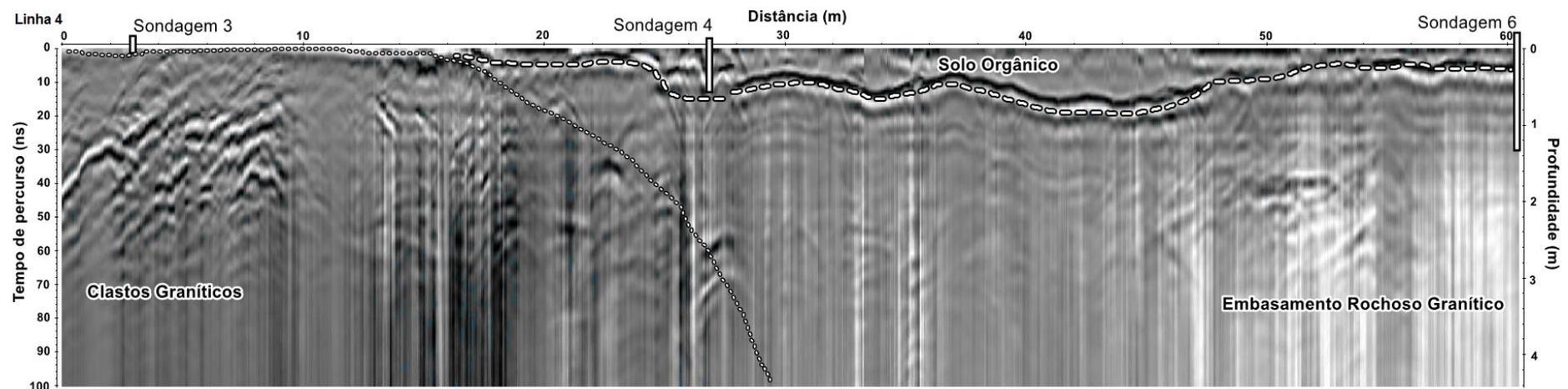
Fonte: Autor.

Figura 32 – Radargrama interpretado, linha 3.



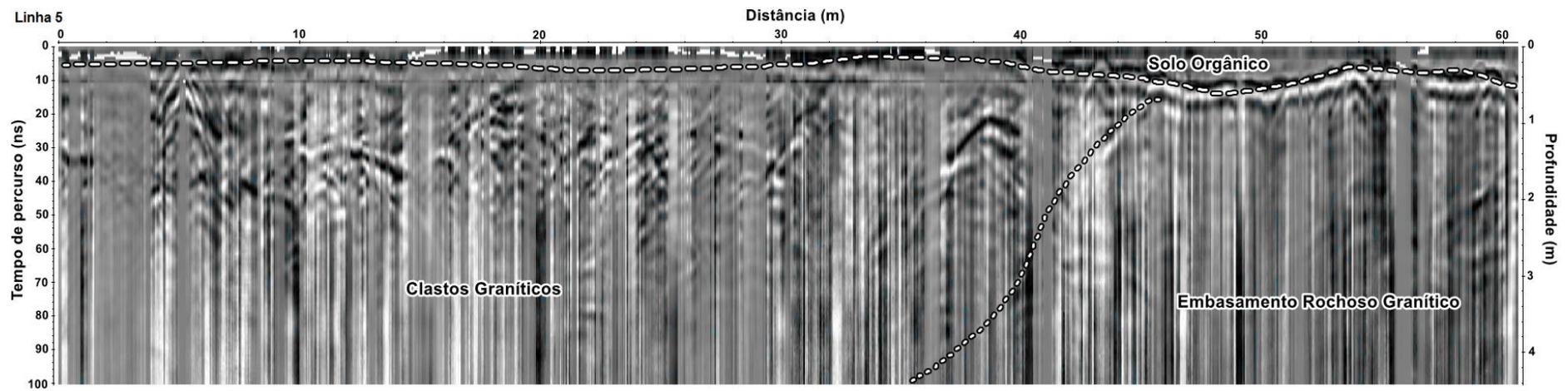
Fonte: Autor.

Figura 33 – Radargrama interpretado, linha 4.



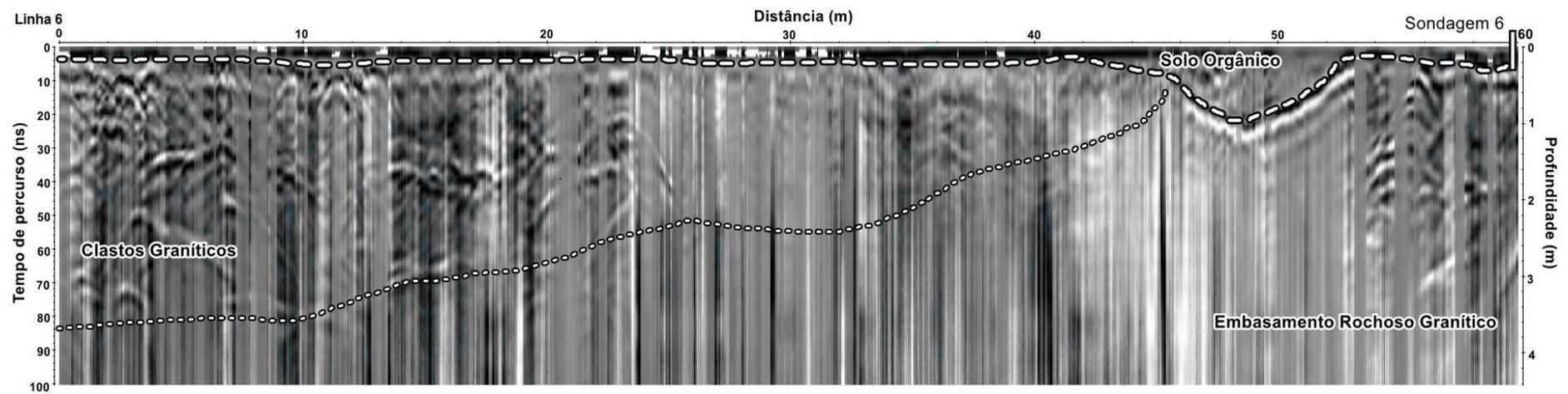
Fonte: Autor.

Figura 34 – Radargrama interpretado, linha 5.



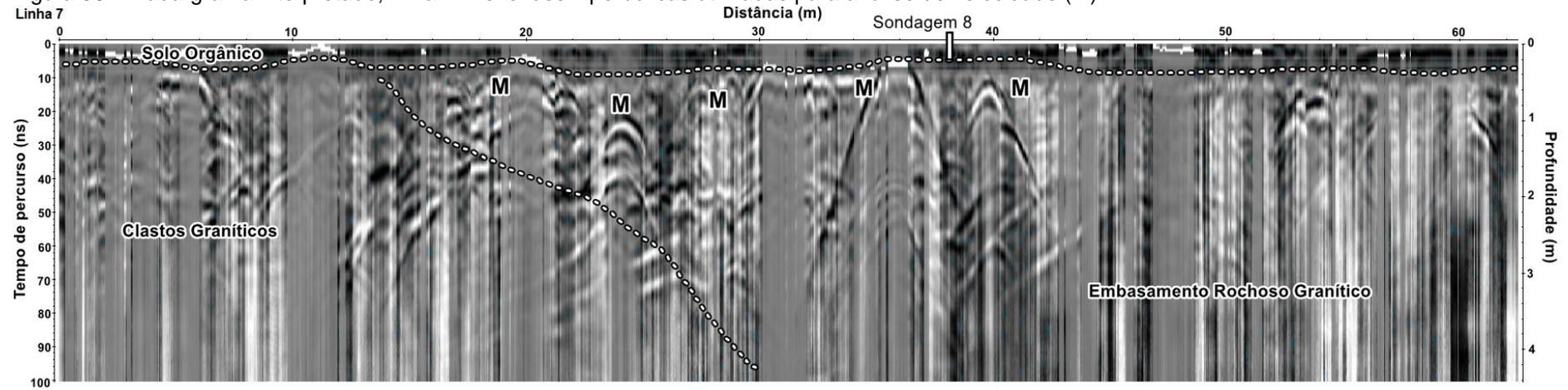
Fonte: Autor.

Figura 35 – Radargrama interpretado, linha 6.



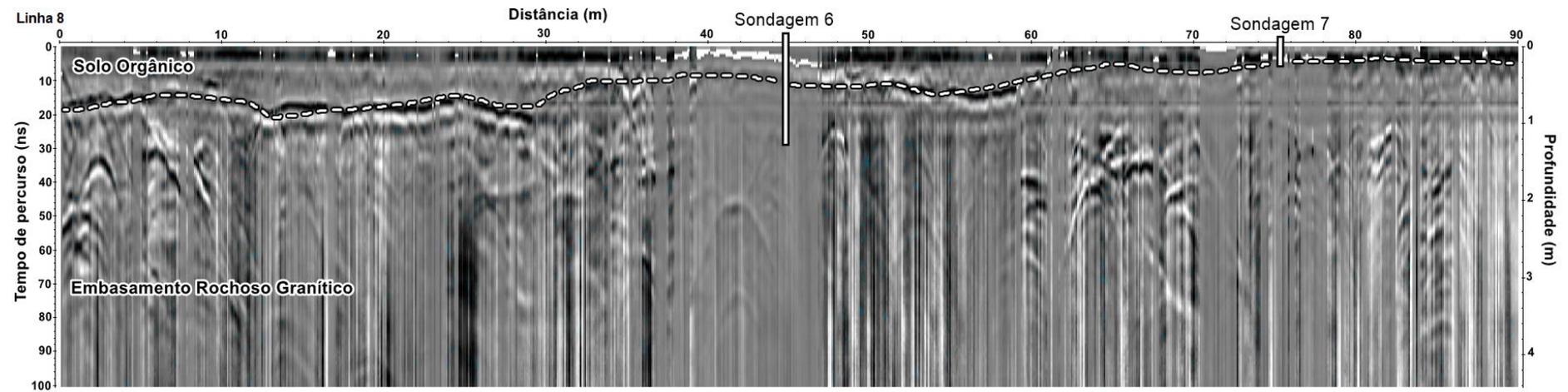
Fonte: Autor.

Figura 36 – Radargrama interpretado, linha 7. Reflexões hiperbólicas utilizadas para análise de velocidade (M).



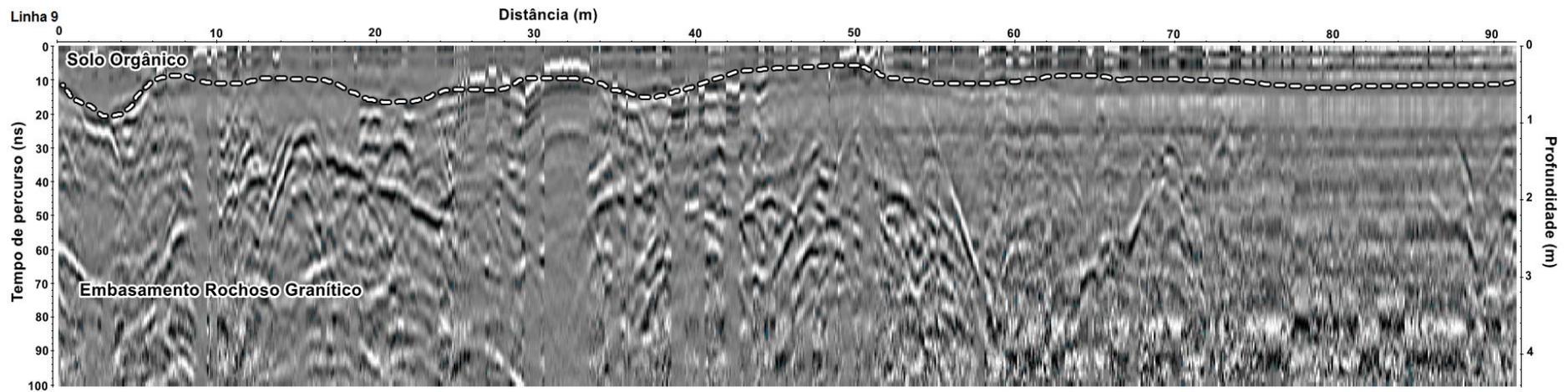
Fonte: Autor.

Figura 37 – Radargrama interpretado, linha 8.



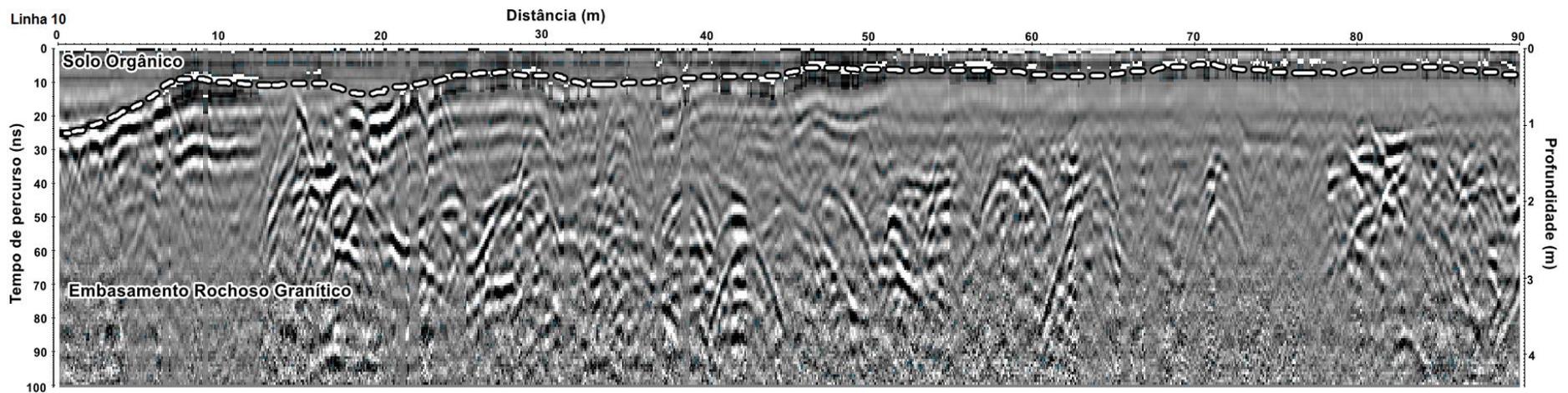
Fonte: Autor.

Figura 38 – Radargrama interpretado, linha 9.



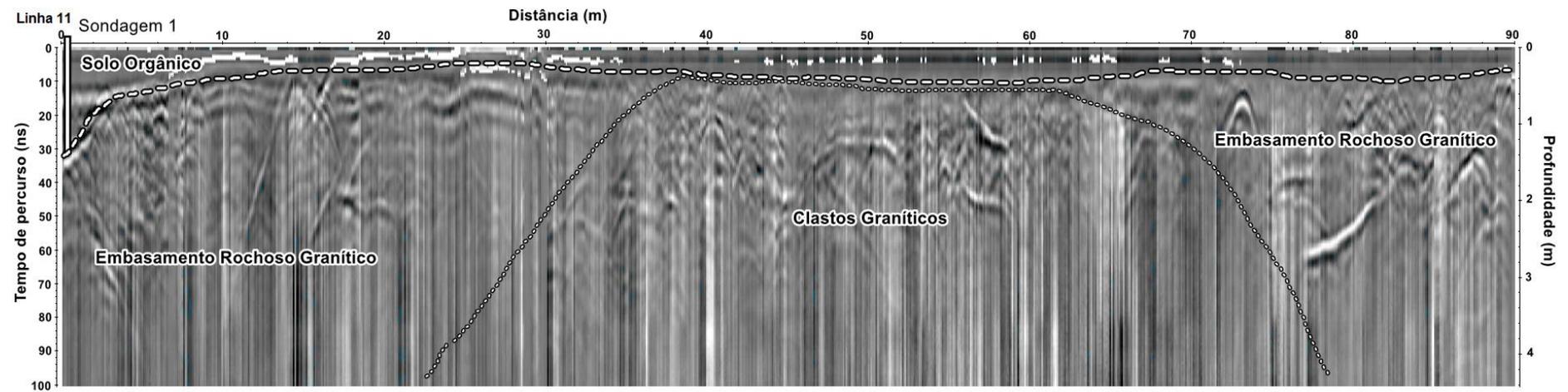
Fonte: Autor.

Figura 39 – Radargrama interpretado, linha 10.



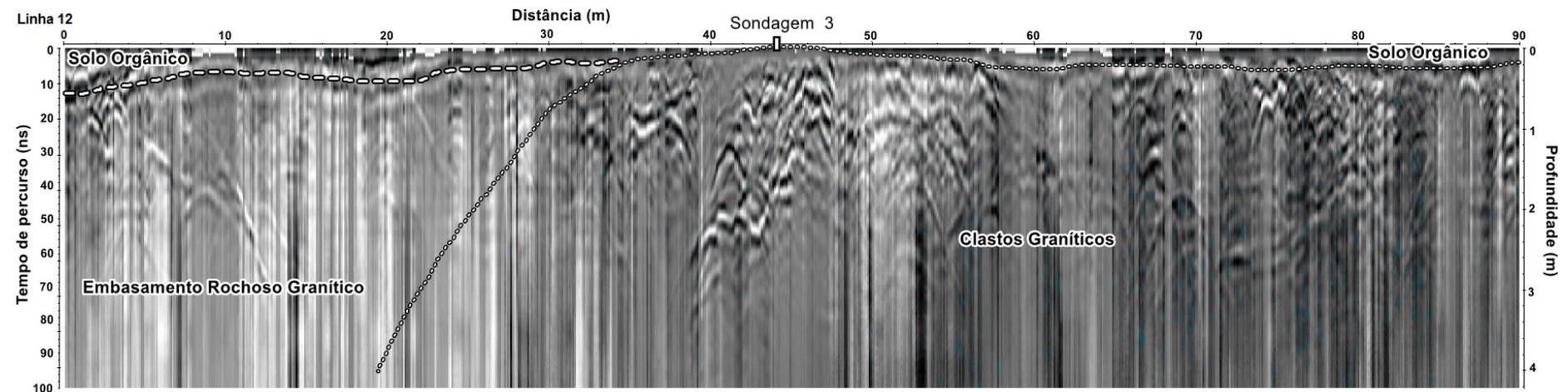
Fonte: Autor.

Figura 40 – Radargrama interpretado, linha 11.



Fonte: Autor.

Figura 41 – Radargrama interpretado, linha 12.



Fonte: Autor.

9 Conclusões

As frequências centrais de antenas são erroneamente generalizadas com a resolução e profundidade de investigação longitudinal como se fossem linearmente pré-estabelecidas. Embora não recomendada para estudos superficiais de solos e de caracterização do embasamento rochoso próximo a superfície, as antenas blindadas de 80 MHz combinadas a configuração mais apropriada dos parâmetros de aquisição do GPR para este estudo (espaçamento entre antenas, espaçamento entre traços e frequência de amostragem) demonstraram ótimo desempenho em delinear refletores inferiores a profundidade de 1m em ambiente de contrastes dielétricos abruptos (solo – embasamento rochoso e solo – camada de clastos graníticos) e gradativos (solo – rocha alterada – embasamento rochoso).

As dimensões dos clastos graníticos (Figura 19) eram inferiores a resolução máxima lateral do sistema de aquisição. Porém como estão em grande quantidade e formam uma camada de clastos com granulação tipo cascalho a cascalho grosseiro até uma profundidade de aproximadamente 4 metros, foram registrados com boa resolução e interpretados nas linhas 3, 4, 5, 6, 7, 11 e 12. Delineando as regiões de clastos nos radargramas e projetando estas áreas lateralmente a 15 m entre linhas e a 4 m em profundidade. É estimado que nesta área tenha em torno de 4500 m³ de clastos graníticos angulosos com granulometria tipo cascalho a cascalho grosseiro, seixos e matacões. Nos quais poderão server de material de construção para uma possível edificação no local. Auxiliando assim no planejamento financeiro de futuras obras.

Os valores calculados para a velocidade da onda eletromagnética no solo e para a constante dielétrica do mesmo, apresentaram valores coerentes à resultados presentes na literatura (Tabela 2).

Embora em algumas descrições de sondagens apresentar dois tipos de solos em um mesmo perfil (solo orgânico e solo argiloso) acredita-se que não haja dois horizontes de solo bem definidos na área de estudo devido à ausência de refletores que auxiliariam na determinação lateral e longitudinal deste segundo horizonte de solo entre o solo orgânico e a rocha alterada. A maioria das descrições das sondagens apresentam um perfil geológico de solo orgânico e rocha. Uma alternativa a esta proposta seria que o perfil geológico da área seja composto por solo orgânico, rocha

alterada preenchida com solo argiloso (proveniente do intemperismo da rocha granítica) e embasamento consolidado.

A integração dos valores obtidos pelo método de GPR e das sondagens foram cruciais para determinar uma camada de solo orgânico de aproximadamente 0,50 a 0,60 m de espessura em sua grande parte, e uma zona de rocha alterada de 2 m. A 3 m de profundidade ainda há refletores, nos quais caracterizam zonas fraturadas do topo do embasamento rochoso, porém para fins geotécnicos e de instalação de fundações acredita-se que já seria uma zona de suporte estável para as bases das obras civis.

10 Referências

ALLRED, B. J.; DANIELS, J. J.; EHSANI, M. R.; **Handbook of Agricultural Geophysics**. 2008. London. Crc Press Taylor & Francis Group.

ANNAN, A.P.; **Ground-Penetrating Radar, Near-Surface Geophysics**. 2005, Tulsa, Oklahoma, USA. Society of Exploration Geophysicists, Cap. 11. p. 357-434.

BENSON, R.; GLACCUM, R.; **The application of ground-penetrating radar to soil surveying for National Aeronautical and Space Administration (NASA)**. 1979. Miami, Florida.

BITENCOURT, M.F.; **Metamorfismo da Região de Caçapava do Sul, RS**. Geologia e relações com o corpo granítico. Porto Alegre, 1983. In: SIMP. SUL-BRAS. GEOL., Atas...Porto Alegre. SBG. p. 37-48.

BORGES, W. R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicação no planejamento urbano e meio ambiente**: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. São Paulo. 2007. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

BUTNOR, J. R.; DOOLITTLE, J.A.; JOHNSON, K.H.; **Using ground penetrating radar to characterize soil frost**. 2003. Soil Sci. Soc. Am. J.; p. 1607–1615.

CLAESSEN, Marie Elisabeth Christine et al (Org.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Embrapa-cnps. Documentos 1, 1997. 212 p. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Manual+de+Metodos_000fzvhotqk02wx5ok0q43a0ram31wtr.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2016.

COLLINS, M. E.; DOOLITTLE, J.A.: **Using ground-penetrating radar to study soil microvariability**. 1987. *Soil Sci. Soc. Am. J.*

COLLINS, M. E.; CRUM, M.; HANNINEN, P.; **Using ground-penetrating radar to investigate a subsurface karst landscape in north-central Florida**. 1994. *Geoderma. P.* 1–15.

CURTIS, J.O.; **Moisture effects on the dielectric properties of soils**. 2001. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, pp. 125–128.

DANIELS, David J. (Ed.). **Ground Penetrating Radar - end Edition**. 2. ed. London: The Institution Of Electrical Engineer, 2004. 761 p.

DAVENPORT, C.G.; GRIFFIN, T.J.; LINDERMANN, J.W.; HEIMMER, D.; **Geoscientists and Law Officers Work Together in Colorado**. 1990. *Geotimes*, Vol., 35, No., 7, pp. 13-15.

DAVENPORT, C.G.; LINDERMANN, J.W.; GRIFIN T.J.; BOROWSKI, J.E.; **Geotechnical Applications 3: Crime Scene Investigation Techniques**. 1988. *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, Vol., 7, No., 8, pp. 64-66.
DOOLITTLE, J.A.; COLLINS, M.E.; **Use of soil information to determine application of ground penetrating radar**. 1995. *Journal of Applied Geophysics*. 33, 101–108.

DOOLITTLE, J. A.; MINZENMAYER, S. W.; WALTMAN, E. C.; **Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States**. 2002.

DOOLITTLE, J. A. et al. Ground Penetrating Radar Soil Suitability Maps. **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems** . 2003. Newton Square, Pennsylvania.

EVANS, J. **Plantation forestry in the tropics**. 1992. 2 ed. Oxford: Oxford University Press. 403 p.

FARRISH, K.W., J.A. DOOLITTLE, AND E.E. GAMBLE. **Loamy substrata and forest productivity of sandy glacial drift soils in Michigan**. 1990. *Can. J. Soil Sci.* 70:181–187.

FARRISH, K.W., J.A. DOOLITTLE, AND E.E. GAMBLE. 1990. Loamy substrata and forest productivity of sandy glacial drift soils in Michigan. *Can. J. Soil Sci.* 70:181–187.

France D.L., Griffin, T.J., Swanburg, J.G., Lindemann, J.W., Davenport, G.C.; **A Multidisciplinary Approach to the Detection of Clandestine Graves**. 1992. *Journal of Forensic Science*, Vol. 37, p. 1445-1458.

GROTE, K. et al. **Characterization of Soil Water Content Variability and Soil Texture using GPR Groundwave Techniques**. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 2010. Eau Claire, Wisconsin, p. 93-110.

FRANCE, D.L.; GRIFFIN, T.J.; SWANBURG, J.G.; LINDERMANN, J.W.; DAVENPORT, G.C.; TRAMMELL, V., et al., 1997. **NecroSearch Revisited: Further Multidisciplinary Approaches to the Detection of Clandestine Graves**. In: Haglund W.D., Sorg M.H., editors. *Forensic Taphonomy: The Postmortem Fate of Human Remains*. Boca Raton, Florida: CRC Press, pp. 497-509.

FRANCKE, J.; **A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource evaluations**. 2011. Vancouver, Canada. *Journal of Applied Geophysics*. p. 29-37.

FREELAND, R. S.; BRANSON, J. L.; AMMONS, J. T.; LEONARD, L. L.; **Surveying perched water on anthropogenic soils using non-intrusive imagery**. 2001. *Trans. ASAE*.

FREELAND, R. S.; YODER, R. E.; AMMONS, J. T.; **Mobilized surveying of soil conductivity using electromagnetic induction**. 2002. *Appl. Eng. Agric.*

GALAGEDARA, L. W.; PARKIN, J. D.; REDMAN, P.; **Field studies of the GPR ground wave method for estimating soil water content during irrigation and drainage**. 2005. *J. Hydrology*. 301(1–4):182–197.

GISH, T. J., et al. **Evaluating use of ground-penetrating radar for identifying subsurface flow pathways**. 2002. *Soil Sci. Soc. Am. J.*

GISH, T. J.; WALTHALL, C. L.; DAUGHTRY C. S. T.; KUNG, K. J. S. **Using soil moisture and spatial yield patterns to identify subsurface flow pathways**. 2005.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.; **Fundamentos de Física 3: Eletromagnetismo**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABDR, 2009. 350 p. Tradução e Revisão Técnica: Denise Helena da Silva Sotero, Gerson Bazo Costamilan.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física 4: Óptica e Física Moderna**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABDR, 2009. 416 p. Tradução e Revisão Técnica: Ronaldo Sergio de Biasi.

HARMAN, R.; HOLLOWAY, J.; Broach, J., **Detection and remediation technologies for mines and minelike targets VIII**. 2003.

HARTEMINK, A. E.; MINASNY, B.; **Towards Digital Soil Morphometrics**. 2014. Geoderma. Madison, Wisconsin.

HELMS, D. et al.; **On digital soil mapping**. 2002. Geoderma 117. p 3 – 52.

JOL, H. M. (Ed.). **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. 2009. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science. 508 p.

JOHNSON, R. W., GLACCUM, R.; WOJTASINSKI, R.; **Application of ground penetrating radar to soil survey**. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings. 1980. Florida.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **Geofísica de Exploração**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2009. 422 p. Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho.

KIMSEY, M.J., JR., J. MOORE, AND P. MCDANIEL. 2008. **A geographically weighted regression analysis of Douglas-fir site index in north central Idaho**. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:357–366.

KOPPENJAN, S. K. et al. **The Application of GPR in Florida for Detecting Forensic Burials**. 2003. Symposium On The Application Of Geophysics To Engineering And Environmental Problems. Gainesville, Florida, p. 635-649.

KOPPENIAN, S. K. **Mapping golf course green drainage systems and subsurface features using ground penetrating radar**. 2002. Santa Barbara, CA. Ninth International Conference on Ground-Penetrating Radar. Proceedings of SPIE.

KOWALSKY, M. B.; FINSTERLE S.; RUIBIN Y.; **Estimating flow parameter distributions using groundpenetrating radar and hydrological measurements during transient flow in the vadose zone**. 2004. Adv. In Water Resour.

LEINZ, V.; BARBOSA, A.F.; TEIXEIRA, E.; **Mapa Geológico Caçapava-Lavras**. Porto Alegre. 1941. Secr.Agr.Ind.Com.39 p. (Bol. 90)

LEITE, J.A.D.; MCNAUGHTON, N.J.; HARTMANN, L.A.; CHEMALE Jr., F.; REMUS, M.V.D.; **SHRIMP U/Pb zircon dating applied to the determination of tectonic events: the example of the Caçapava do Sul Batholith, Pedreira Inducal, Caçapava do Sul, Brazil**. 1995. V Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos,389 a 390 p.

MASSAMBANI, O.; **Texto básico para a disciplina meteorologia com radar: capítulo 1**. 2016. Departamento de Ciências Atmosféricas. IAG-USP. Disponível em: <<http://www.dca.iag.usp.br/www/material/omassamb/Antigo/radar/Fundamentos do Radar - Capitulo 1 - Prof.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

- MATZNER, Richard A. (Ed.). **Dictionary of Geophysics, Astrophysics and Astronomy**. Nova York: CRC, 2001. 525 p.
- METWALY, Mohamed et al. **Landmines detection and assessment using GPR survey**. 2006. Kyoto, Japan. 8th SEGJ International Symposium.
- MILLER et al.; **Evaluating use of ground-penetrating radar for identifying subsurface flow pathways**. 2002. Soil Sci. Soc. Am. J.
- MILSON, J.; **Field Geophysics**. 2003. 3. ed. London: John Wiley & Sons Ltd., 2003. 249 p. (The Geological Field Guide Series).
- MCNEILL, J.D.; **Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers, Technical Note TN-6, Geonics Limited, Mississauga**. 1980. ON, Canada.
- Neal, A., 2004, Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: Principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, Vol. 66, pp. 261–330.
- OLIVEIRA, C.; **Caracterização Geofísica do Solo para uso em Agricultura de Precisão**. 2006. 139 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geofísica Aplicada, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/Dissertação_Claudia_de_Oliveira_2006.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2016.
- OLHOEFT, G. R.; CAPRON, D. E.: **Laboratory measurements of the radio frequency electrical and magnetic properties of soils near Yuma, Arizona**. US Department of Interior USGS Open File Report 93-701, 1993
- POPP, José Henrique. **Geologia Geral**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002. 375 p.
- SANCHEZ-RODRIGUEZ, F., R. RODRIGUEZ-SOALLEIRO, E. ESPANOL, C.A. LOPEZ, AND A. MERINO. 2002. **Influence of edaphic factors and tree nutritive status on the productivity of Pinus radiata D. Don plantations in northwestern Spain**. *For. Ecol. Manag.* 171:181–189.
- SERBIN, G., and D. Or. 2004. **Ground-penetrating radar measurement of soil water content dynamics using a suspended horn antenna**. *Trans. Geoscience and Remote Sensing.* 42(8):1695–1705.
- STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. do, SHINEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre**. 2002. EMATER/RS; UFRGS.
- SUCRE, E. B.; TUTTLE, J. W.; FOX, T.R.; **The Use of Ground-Penetrating Radar to Accurately Estimate Soil Depth in Rocky Forest Soils**. 2011. *Forest Science*. Vanceboro, p. 59-66.
- TEIXEIRA, Wilson et al (Org.). **DECIFRANDO A TERRA**. 2000. São Paulo: Oficina de Textos.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J.; **INTEMPERISMO E FORMAÇÃO DO SOLO**. In: TEIXEIRA, Wilson et al (Org.). **DECIFRANDO A TERRA**. 2000. São Paulo: Oficina de Textos, Cap. 8. p. 140-165.

XIE, X. et al. **GPR performances for evaluation of grouting thickness on shield tunnel in soft soil area**. 2009. Sapporo, Japan. 9th SEGL International Symposium – imaging And Interpretation. p. 12-14.

WALTHALL, C. L.; GISH, T. J.; DAUGHTRY, C. S.; DULANEY, W. P.; KUNG, K. J.; MCCARTY, G.; TIMLIN, D.; ANGIER, J. T.: **An innovative approach for locating and evaluating subsurface pathways for nitrogen loss**. 2001. Proceedings of the 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy. The Scientific World.

ANEXO A – Domínios pedológicos de Caçapava do Sul

SIGLA	CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO
B	<p>Brunizém (Chernossolos Ebânicos).</p> <p>Brunizém textura argilosa/muito argilosa e Solos Litólicos eutróficos, chernozêmico e moderada textura média e argilosa, substrato andesítico, relevo ondulado.</p>
PEd	<p>Podzólico Vermelho-Escuro distrófico (Argilossolos Vermelhos).</p> <p>1 – Podzólico Vermelho-Escuro distrófico, moderada textura média/argilosa relevo suave ondulado a ondulado.</p> <p>2 – Podzólico Vermelho-Escuro distrófico, moderada textura média/argilosa relevo ondulado.</p> <p>5 – Podzólico Vermelho-Escuro distrófico e eutrófico, moderada textura média/argilosa, Podzólico Vermelho-Amarelado eutrófico e distrófico, textura média/argilosa relevo suave ondulado e Solos Litólicos eutróficos e distróficos, textura média substrato arenito, relevo ondulado.</p>
PVd	<p>Podzólico Vermelho-Amarelado distrófico (Argilossolos Vermelho-Amarelos).</p> <p>14 – Podzólico Vermelho-Amarelado distrófico e eutrófico com textura média cascalhenta/argilosa e cascalhenta. Podzólico Bruno-Acinzentado distrófico e eutrófico com textura média cascalhenta/argilosa e Solos Litólicos distróficos e eutróficos, textura média cascalhenta, substrato migmatítico, relevo ondulado e forte ondulado.</p>
PVe	<p>Podzólico Vermelho-Amarelado eutrófico (Argilossolos Vermelho-Amarelos).</p> <p>2 – Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico, textura média/argilosa e Solos Litólicos eutróficos e distróficos, textura média, substrato de arenito, relevo ondulado.</p> <p>3 – Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico, textura média/argilosa e Solos Litólicos eutróficos e distróficos, textura média, substrato de arenito, relevo suave ondulado e ondulado.</p>

	<p>4 – Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico, textura média/argilosa e Solos Litólicos eutróficos e distróficos, textura média cascalhenta, substrato de arenito, relevo ondulado e forte ondulado.</p>
PLE	<p>Planossolo eutrófico (Planossolos Hápicos e Planossolos Hidromórficos).</p> <p>1- Planossolo eutrófico, textura arenosa/média e média/argilosa, relevo plano.</p> <p>2 – Planossolo eutrófico, textura arenosa/média e média/argilosa e Gleissolo eutrófico, textura média e argilosa, relevo plano.</p>
Rd	<p>Solos Litólicos distróficos (Neossolos Litólicos).</p> <p>4 – Solos Litólicos distróficos, textura média cascalhenta, substrato migmatítico, relevo ondulado e forte ondulado, afloramentos de Rocha.</p> <p>5 – Solos Litólicos distróficos, textura média, substrato riolítico. Cambissolo distrófico, textura argilosa e Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico, textura média/argilosa e média cascalhenta/argilosa, relevo suave ondulado.</p> <p>6 – Associação Complexa de Solos Litólicos distróficos, textura média cascalhenta substrato migmatítico com Cambissolo distrófico, textura média cascalhenta e argilosa cascalhenta e Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico, textura média/argilosa, relevo ondulado e suave ondulado.</p>
Re	<p>Solos Litólicos eutróficos (Neossolos Litólicos).</p> <p>5 – Solos Litólicos eutróficos, textura média cascalhenta, substrato andesítico e Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico, textura média cascalhenta/argilosa relevo forte ondulado e ondulado.</p> <p>12 – Solos Litólicos eutróficos, textura média cascalhenta, fases pedregosas e não pedregosas, substrato de xistos, relevo forte ondulado e afloramentos de Rocha.</p> <p>14 – Solos Litólicos eutróficos e distróficos, textura arenosa e média, substrato arenítico relevo forte ondulado e ondulado, afloramentos de Rocha.</p>

<p>15 – Solos Litólicos eutróficos e distróficos, textura arenosa média, substrato arenítico, relevo forte ondulado e montanhoso, afloramentos de Rocha.</p> <p>18 – Associação Complexa de Solos Litólicos eutróficos, textura média cascalhenta, substrato de xistos com Cambissolo eutrófico, textura média cascalhenta e argilosa cascalhenta e Brunizém Avermelhado, textura média/argilosa cascalhenta, relevo ondulado e forte ondulado.</p> <p>21 – Associação Complexa de Solos Litólicos eutróficos, textura moderada média cascalhenta, substrato de xistos com Cambissolo eutrófico, textura média e argilosa cascalhenta. Brunizém avermelhado textura média/argilosa cascalhenta e Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico e eutrófico, textura média/argilosa, relevo ondulado e suave.</p> <p>22 – Associação Complexa de Solos Litólicos eutróficos, textura moderada média cascalhenta, substrato de xistos com Cambissolo eutrófico, textura média e argilosa cascalhenta. Brunizém avermelhado textura média/argilosa cascalhenta, relevo forte ondulado e afloramentos de Rocha.</p>

Fonte: Extraído e modificado de mapa Exploratório de Solos do Estado do Rio Grande do Sul, IBGE, 2002.

ANEXO B – *Clutter*

Clutter

O *clutter* que afeta o sinal do GPR pode ser definido como os sinais que não são relacionados com as características de espalhamento de energia no alvo, mas ocorrem na mesma amostra de janela de tempo e possuem características espectrais similares ao comportamento ondulatório sob o alvo (possui característica similar com a *wavelet* do alvo).

Clutter pode ser causado por ondas diretas, nas quais não penetram o solo mas avançam através do ar oriunda da antena transmissora à receptora, assim como reflexões múltiplas entre a antena receptora e a superfície do solo. *Clutter* irá variar de acordo com o tipo de configuração de antenas. Variações locais nas características de impedância dos materiais e do solo, como um todo, também pode causar *clutter*, assim como incluir pequenos grupos de fontes de reflexão dentro do material. Em geral, *clutter* é mais significativa nos sinais de GPR registrados com pulsos menores, no domínio do tempo, e decrescem em períodos longos. É possível quantificar a taxa de mudanças dos picos dos níveis dos sinais de *clutter* como uma função no tempo. Sobre as mesmas condições em uma seção de estudos com alvos não metálicos o sinal eletromagnético é reduzido por um amplo fator devido à ação de *clutter*, principalmente em alvos delgados e muito próximo a superfície, como o asfalto e camadas finas de cimento. Esta redução em contraste dielétrico entre solo circundante e alvos não metálicos são mais detectáveis e bem delineados em estudos de GPR em condições de solos úmidos do que em solos em condições áridas.

O *clutter* é a principal interferência de sinal em estudos próximos a superfície como em estudos militares com minas terrestres. Este fator limitante não é apenas causado pela topografia do local, mas também por heterogeneidades volumétricas e composicionais de pequenos alvos dispostos aleatoriamente sobre o solo e em subsuperfície. Tais quais: poças de água, feixes de grama, toca de animais, fissuras no solo, frações de rochas como seixo e cascalho assim quanto pequenos fragmentos metálicos, como estilhaços de projéteis, cartuchos e munições utilizadas.