

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FELIPE AUGUSTO NASCIMENTO DE JESUS

**ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE ONDA ELETROMAGNÉTICA EM
AFLORAMENTO COM OCORRÊNCIA DE CARVÃO DA FORMAÇÃO RIO
BONITO, CANDIOTA-RS**

**Caçapava do Sul
2017**

FELIPE AUGUSTO NASCIMENTO DE JESUS

**ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE ONDA ELETROMAGNÉTICA EM
AFLORAMENTO COM OCORRÊNCIA DE CARVÃO DA FORMAÇÃO RIO
BONITO, CANDIOTA-RS**

Orientador: Felipe Caron
Coorientador: Éverton Frigo

**Caçapava do Sul
2017**

J58e Jesus, Felipe Augusto Nascimento
ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE ONDA DE
RADAR DE RADAR PENETRAÇÃO DE SOLO (GPR)
EM AFLORAMENTO COM OCORRÊNCIA DE CARVÃO
DA FORMAÇÃO RIO BONITO, CANDIOTA-RS / Felipe
Augusto Nascimento Jesus.
75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)--
Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2017.
"Orientação: Felipe Caron".

1. GPR. 2. Velocidade. 3. Carvão. 4. Candiota. 5.
Teste com barra.

FELIPE AUGUSTO NASCIMENTO DE JESUS

**ESTIMATIVA DE VELOCIDADE DE ONDA ELETROMAGNÉTICA EM
AFLORAMENTO COM OCORRÊNCIA DE CARVÃO DA FORMAÇÃO RIO
BONITO, CANDIOTA-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Geofísica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 1 de dezembro de 2017

Banca examinadora:



Prof. Dr. Felipe Caron
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
UNIPAMPA



Prof. Me. Hasan Shihadeh
UNIPAMPA

AGRADECIMENTO

A minha família, minha gratidão pelos conselhos e apoio incondicional durante os anos que estive me dedicando a graduação.

Ao Prof. Dr Felipe Caron pela orientação e pelo apoio para que eu realizasse o trabalho de conclusão de curso.

Ao Prof. Dr. Felipe Guadagnin pela oportunidade do projeto de iniciação científica.

Ao Prof. Dr Mario Rosales por me mostrar que a Geofísica não é suco de uva.

Aos professores, minha gratidão pela forma de conduzir o curso em todas as etapas.

Aos professores do Laboratório de Análise de Sinais Geofísicos (LASG) pelo convívio e pelos momentos de orientação ao decorrer desse ano.

Ao pessoal do RU que me pouparem muito dinheiro e me alimentarem com qualidade neste último ano.

Aos colegas que irão se formar comigo pelo convívio e pelos momentos de amizade ao longo do curso.

Aos meus amigos Guilherme Navarro, Guilherme Giglio, Cláudio Pavanello, Lucca Guirado, Pedro Augusto, Pedro Lessa, Carlos Henrique, Gustavo Sabonare, Lucas de Paula, Calvin Verner, Renato Potter, Fernando Laudanna e Gabriel Aro pela parceria durante os anos que estive me dedicando a graduação.

Aos meus amigos Lucas Rosso, Eduardo Lopes, Rodrigo Franco, Andréia Pompermayer e Antônio Pereira, que assim como eu desenvolveram suas atividades no LASG, pela ajuda e amizade.

Aos amigos que fiz durante os anos que estive em Caçapava do Sul Indio, Parazin, Parazão, John, Juno, Samuca, Padrin, Xina, Yuri, Huda, Presida, Brunão, Godinho, Guilherme Alcalde, Jhones, Davi, Hugo, Veni, Bixão, Lissa, Alane e Marieli pela amizade, noites de CS, treinos, rolês e conversas.

Em especial a minha melhor amiga e namorada Bruna Farias, por me mostrar que minha capacidade vai muito mais além do que eu imagino e me motivar todos os dias a ser a melhor versão de mim mesmo.

“Eu não quero acreditar, eu quero saber”

Carl Sagan

RESUMO

Candiota possui a maior reserva conhecida de carvão mineral do Brasil, lavrada em sua maioria a poucos metros de profundidade. No caso da exploração rasa, diversos estudos destacam a eficácia do método de radar de penetração de solo (*GPR*) no contexto de exploração desse recurso mineral. Porém, nos mesmos estudos a maioria dos autores chama atenção para a qualidade dos parâmetros de calibração do equipamento para que possam ser extraídos resultados consistentes desse método. Esse trabalho teve como objetivo estimar a velocidade de ondas eletromagnéticas em estratos com ocorrência de carvão da Formação Rio Bonito, através do teste com barra metálica em um corte de rocha, a partir dele foi possível determinar as velocidades de pacotes arenosos e siltsosos, $0,13636 \text{ m/ns}$ e $0,05127 \text{ m/ns}$ respectivamente, sobre uma camada portadora de carvão, além de relacionar as litofácies de cada estrato aflorante com padrões de reflexões registrados em radargramas, de modo que a compilação dos resultados obtidos forneceu subsídios para aplicação do método *GPR* no apoio a exploração de carvão na região de Candiota e localidades com litologias semelhantes.

Palavras-chave: *GPR*, Candiota, carvão, velocidade, teste com barra

ABSTRACT

Candiota city has the most extensive known reserve of coal mineral in Brazil, which is drilled only a few meters deep. In the case of shallow exploration, several studies highlight the effectiveness of the ground penetration radar method (GPR) in an exploration project. However, in some studies, most authors draw attention to the quality of equipment calibration parameters, so that consistent results are obtained from this method. The primary goal of this work is to estimate the electromagnetic wave velocity in strata with the occurrence of coal from the Rio Bonito Formation, through the test with a metallic bar in a rock cut. From this, it was possible to determine the velocities of sandy and silty packages, 0,13636 m/ns and 0,05127 m/ns respectively, on a layer of coal and to relate the lithofacies of each outcropping stratum with reflected patterns of radargrams. Thus, the compilation of the results obtained provided subsidies for the application of the GPR method to support coal exploration in the Candiota region and localities with similar lithologies.

Keywords: GPR, Candiota, coal, velocity, bar test

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
2 OBJETIVO.....	21
2.1 Objetivo Geral.....	21
2.2 Objetivos Específicos.....	21
3 ÁREA DE ESTUDO.....	22
3.1 Localização.....	22
3.2 Geologia Regional.....	23
3.3 Geologia Local.....	25
3.4 Camadas de Carvão.....	26
4 TEORIA DO MÉTODO <i>GROUND PENETRATING RADAR (GPR)</i>.....	26
4.1 Propriedades Eletromagnéticas dos Materiais.....	27
4.2 Natureza Ondulatória do Campo Eletromagnético.....	28
4.3 Propagação de Ondas Eletromagnéticas.....	29
4.4 Sinal do <i>GPR</i>	30
4.5 Amostragem.....	31
4.6 Aquisição de dados.....	31
4.7 Ruído e Blindagem.....	32
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
5.1 Determinação do Local de Pesquisa.....	33
5.2 Desenvolvimento de Mapas Geológicos e de Localização.....	34
5.3 Descrição Faciológica do Afloramento.....	34
5.4 Estimativa de Velocidade de Onda Eletromagnética.....	35
5.5 Correção de Dix.....	36
5.6 Aquisição de Dados <i>GPR</i>	37
5.7 Posicionamento dos Alvos.....	38
5.8 Controle do Sinal.....	39
5.9 Aquisição de Dados Topográficos.....	40
5.10 Processamento de Dados <i>GPR</i>	40
5.10.1 Filtragem.....	41
5.10.2 Ganho.....	41
5.10.3 Processamento Aplicado.....	42
5.10.3.1 <i>Dewow</i>	43

5.10.3.2 Correção Estática.....	43
5.10.3.3 Função Ganho.....	43
5.10.3.4 Corte no Tempo.....	44
5.10.3.5 Passa-banda.....	44
5.10.3.6 Ganho Manual.....	44
5.10.3.7 Reversão.....	44
5.10.3.8 Filtragem FK.....	45
5.10.3.9 <i>Background Removal</i>	45
5.10.3.10 Correção Topográfica.....	45
5.10.3.11 Pickagem.....	46
5.10.3.12 Migração.....	46
5.10.3.13 Conversão tempo-profundidade.....	46
5.11 Interpretação.....	46
5.12 Tratamento de Imagem.....	47
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
6.1 Descrição Faciológica.....	47
6.2 Dados Topográficos.....	48
6.3 Dados <i>GPR</i>	48
6.3.1 Dados Brutos.....	49
6.3.2 Dewow.....	49
6.3.3 Correção Estática.....	50
6.3.4 Função Ganho.....	51
6.3.5 Corte no Tempo.....	52
6.3.6 Passa-banda.....	52
6.3.7 1º Ganho Manual.....	54
6.3.8 Reversão.....	55
6.3.9 Filtragem FK.....	55
6.3.10 2º Ganho manual.....	58
6.3.11 <i>Background Removal</i>	59
6.3.12 Correção Topográfica.....	59
6.3.13 Identificação dos alvos/Estimativa de velocidade.....	61
6.3.14 Pickagem.....	63
6.3.15 Migração.....	65
6.3.16 Conversão tempo-profundidade.....	66

6.4 Interpretação.....	67
6.5 Descrição de Radarfácies.....	69
6.6 Comparação com Estudos Anteriores.....	70
6.7 Compilação de Resultados.....	72
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

Em 2013, as reservas mundiais de carvão foram estimadas em cerca de 860 bilhões de toneladas (THOMAS, 2013). Este valor é aproximadamente seis vezes maior que as reservas de petróleo e quatro vezes maior que de gás natural. A disponibilidade deste recurso assegura a importância deste material como recurso energético e base para a indústria moderna.

Os depósitos de carvão de importância econômica no Brasil ocorrem na porção Sul do país, compreendendo os estados do Paraná (PR), Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS). Estes estados são conhecidos por suas camadas de carvão lavradas desde o início dos anos de 1900 (ABCM, 2017).

Segundo Kalkreuth (2006), Seccatore e Marin (2011) as reservas brasileiras, somadas, são de 32 bilhões de toneladas das quais 89,23% estão localizadas no Rio Grande do Sul, 10,42% em Santa Catarina e o restante (0,35%) nos estados de São Paulo e Paraná. A jazida Candiota, localizada no município de Candiota é a maior do país representando a parcela de 40% do total de recursos nacionais e cerca de 44% dos recursos do Estado do Rio Grande do Sul (RAMGRAB & WILDNER, 1999).

Save (2004) ressalta, em seu estudo, o apontamento do *Strategic Center for Coal Program* do *Department of Energy* dos Estados Unidos sobre a importância do desenvolvimento tecnológico e melhorias do conhecimento científico sobre a produção de carvão, a fim de permitir a prosperidade econômica e fortalecimento da segurança energética da nação ao reduzir a dependência de importação de combustíveis fósseis.

Nos últimos 40 anos, a Geofísica passou a ser aplicada em todo o mundo na exploração de carvão, atuando na identificação de camadas, planejamento e operação de minas, além do monitoramento ambiental (HATHERLY, 2013; THOMAS, 2013). Em comparação com as outras rochas tipicamente encontradas em depósitos sedimentares, o carvão possui parâmetros petrofísicos significativamente distintos, o que assegura que este tipo de rocha seja alvo para diversos tipos de levantamentos geofísicos (HATHERLY, 2013).

A Geofísica aplicada a exploração de carvão atua em duas principais escalas de pesquisa (HATHERLY, 2013) (THOMAS, 2013). A primeira é de pequena escala onde são utilizados métodos gravimétricos, sísmica de reflexão, aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos para mapeamento geológico, delimitação do

enquadramento sedimentar e regime estrutural da área. A segunda é de grande escala onde são utilizados métodos eletromagnéticos (*Ground Penetrating Radar, Very Low Frequency, Time-Domain Electromagnetic Surveying*) eletrorresistividade, microgravimetria, sísmica de reflexão e refração, e sondagem de poços para contribuir na delimitação de áreas de mineração com viés econômico (operações abertas e subterrâneas), identificação de descontinuidades laterais, detecção de espaços vazios na mina e zonas de risco para trabalhadores.

Para estudos de grande escala, Kai (2012) menciona a ineficiência de alguns métodos geofísicos na localização de alvos superficiais (menos de 100 *m* de profundidade). O autor cita o caso da sísmica rasa devido interferências de ondas diretas, refratadas e superficiais. Ainda, no mesmo estudo, o autor destaca o método *Ground Penetrating Radar (GPR)* como eficiente na exploração de alvos localizados a menos de 50 *m* em subsuperfície, contemplando requisitos de precisão e anti-interferência.

Molinda (1996) descreve o método *GPR* como promissor na mineração de carvão, atuando na detecção de zonas de risco de desabamento, aumentando a segurança dos operadores de lavra. Para este método o autor ressalta a importância do controle de qualidade de dados, associado ao tipo de equipamento utilizado (frequência central da antena), contato com superfície, interferência elétrica, ruído cultural, velocidade de deslocamento de equipamento ao longo da aquisição e aprimoramento do sinal (processamento). Como parte da conclusão do estudo o autor sugere o uso de parâmetros precisos (permissividade elétrica, condutividade e velocidade de onda eletromagnética) para obter melhores interpretações das seções adquiridas.

Save (2004) relata sobre a restrição de aquisição de dados imposta pela morfologia de superfície no local de exploração e da importância do conhecimento de variabilidade de propriedades físicas em alvos estratigráficos. Ao final do estudo o autor aponta para alta aplicabilidade do método *GPR* em campos de lavras superficiais devido a facilidade de aquisição e processamento de dados.

Strange (2005) num estudo de automação de máquinas de lavra de carvão, onde essas seriam capazes de medir e manter a lavra em um horizonte específico de carvão, sugere o desenvolvimento de um método que possa ser integrado com o sistema automático de controle de detecção, que seja capaz de distinguir interfaces de carvão de alta qualidade, carvão de baixa qualidade e camadas de rejeitos

(arenitos, folhelhos). Como resultado, o autor descreve o método *GPR* como uma alternativa promissora para as limitações impostas na abordagem do estudo, concluindo que o uso deste método como sensor de controle de horizonte é possível. Ainda, o autor ressalta que a chave para aplicação do *GPR* é o processamento de dados inteligentes em tempo real com uso de parâmetros de calibração precisos.

Weissling e Rubio (2009) apresentam um estudo realizado numa mina ativa em Carbon County, Utah onde o método *GPR* é utilizado para imagear estratos de rochas sedimentares acima e abaixo de uma camada de carvão betuminoso já lavrada. Neste estudo foi conduzido um experimento de calibração num local nas proximidades da mina, sobre um corte rodoviário, onde está localizada uma camada de carvão de 1 m de espessura sobreposta por uma sequência de arenitos. No estudo foi evidenciado melhores resultados com a antena de 200 MHz. Ao final do estudo os autores concluem que o método *GPR* representa o método geofísico mais apropriado para avaliar estruturas geológicas e identificar os estratos envolvidos numa operação de lavra de carvão superficial, atendendo as restrições ambientais e logísticas de aquisição.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral possibilitar, através do método de *GPR* em escala de detalhe, a distinção geométrica e petrofísica de rochas associadas a ocorrência de carvão da Formação Rio Bonito no município de Candiota.

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos são listados:

- Estimar velocidade de ondas de *GPR* em estratos localizados acima de uma camada portadora de carvão aflorante;
- Obter os parâmetros petrofísicos dos estratos a partir das velocidades estimadas (permissividade elétrica);
- Produzir modelos geofísicos-geológicos a partir das seções de *GPR* processadas;

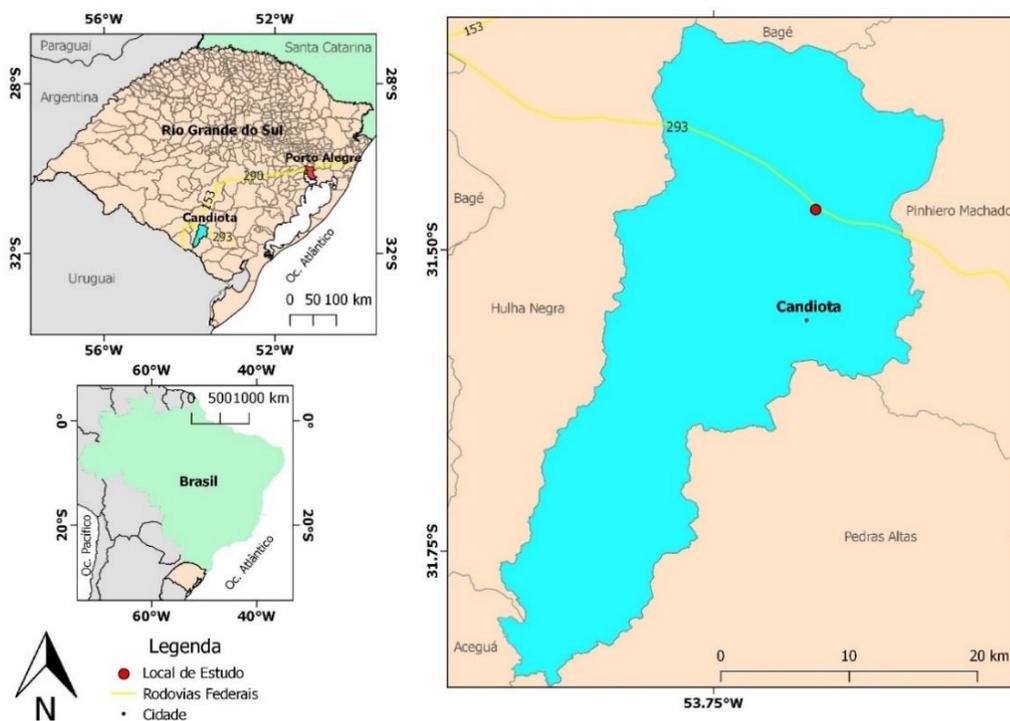
- Correlacionar fácies com padrões de reflexão obtidos nas seções de *GPR* processadas;
- Agregar potencial ao método *GPR* para exploração de carvão em Candiota

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

Este estudo foi realizado a partir de um perfil de aquisição localizados na margem da rodovia BR-293, no quilômetro 137, próximo a cidade de Candiota (Figura 1), onde foi localizado o afloramento nomeado PST nas coordenadas 31.46462 S/53,66579 O (6515827.50 S/246708.04 E, 22J).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo (*datum*: SIRGAS2000)



Fonte: *shapefiles* disponíveis no *geobank*, CPRM (2017).

Na Figura 2 é indicada a posição do afloramento PST (em conjunto com o perfil) em relação a ocorrência geológica do local, retirada da carta geológica Folha Pedro Osório SH.22-Y-C, disponível no banco de dados *Geobank* da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Na Figura 3 é apresentada uma imagem do afloramento PST e do perfil de aquisição (nomeado Perfil PST) ressaltando o conjunto de litologias visíveis no afloramento.

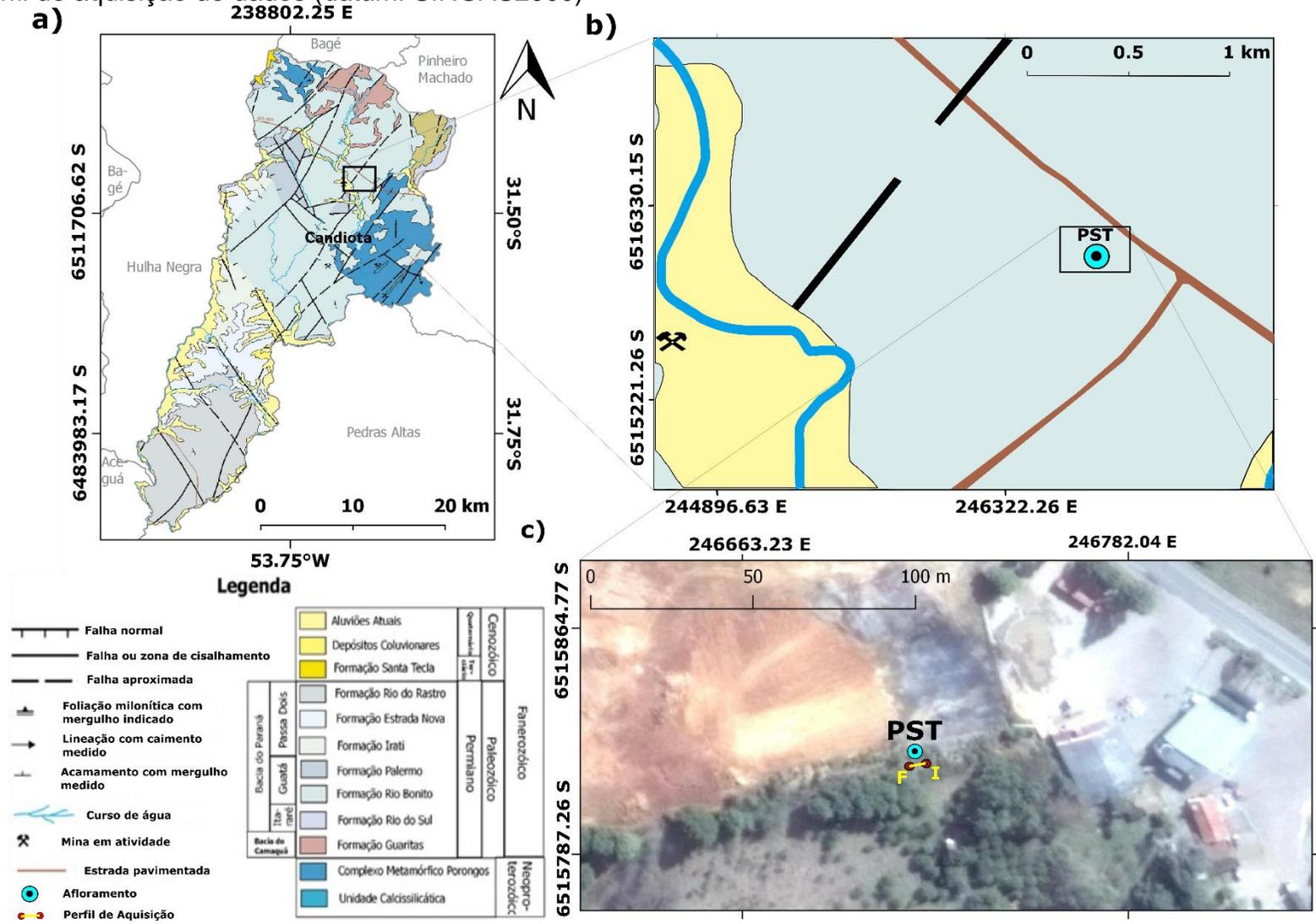
3.2 Geologia Regional

De acordo com Milani (2007), a Bacia do Paraná é uma ampla região sedimentar do continente sul-americano totalizando uma área que se aproxima dos $1,5 \cdot 10^6 \text{ km}^2$. Tem uma forma ovalada com eixo maior N-S, sendo seu contorno atual definido por limites erosivos relacionados à história geotectônica meso-cenozóica do continente sul-americano. Seu registro estratigráfico compreende um pacote sedimentar-magmático com uma espessura total máxima em torno dos 7 mil metros, coincidindo geograficamente o depocentro estrutural da sinéclise com a região da calha do Rio Paraná.

Milani (1997) reconheceu no registro estratigráfico da Bacia do Paraná seis unidades de ampla escala: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). As três primeiras unidades são representadas por sucessões sedimentares definidas por ciclos transgressivo-regressivos ligados a variações do nível relativo do mar no Paleozóico. As demais unidades correspondem a pacotes sedimentares continentais associados a rochas ígneas.

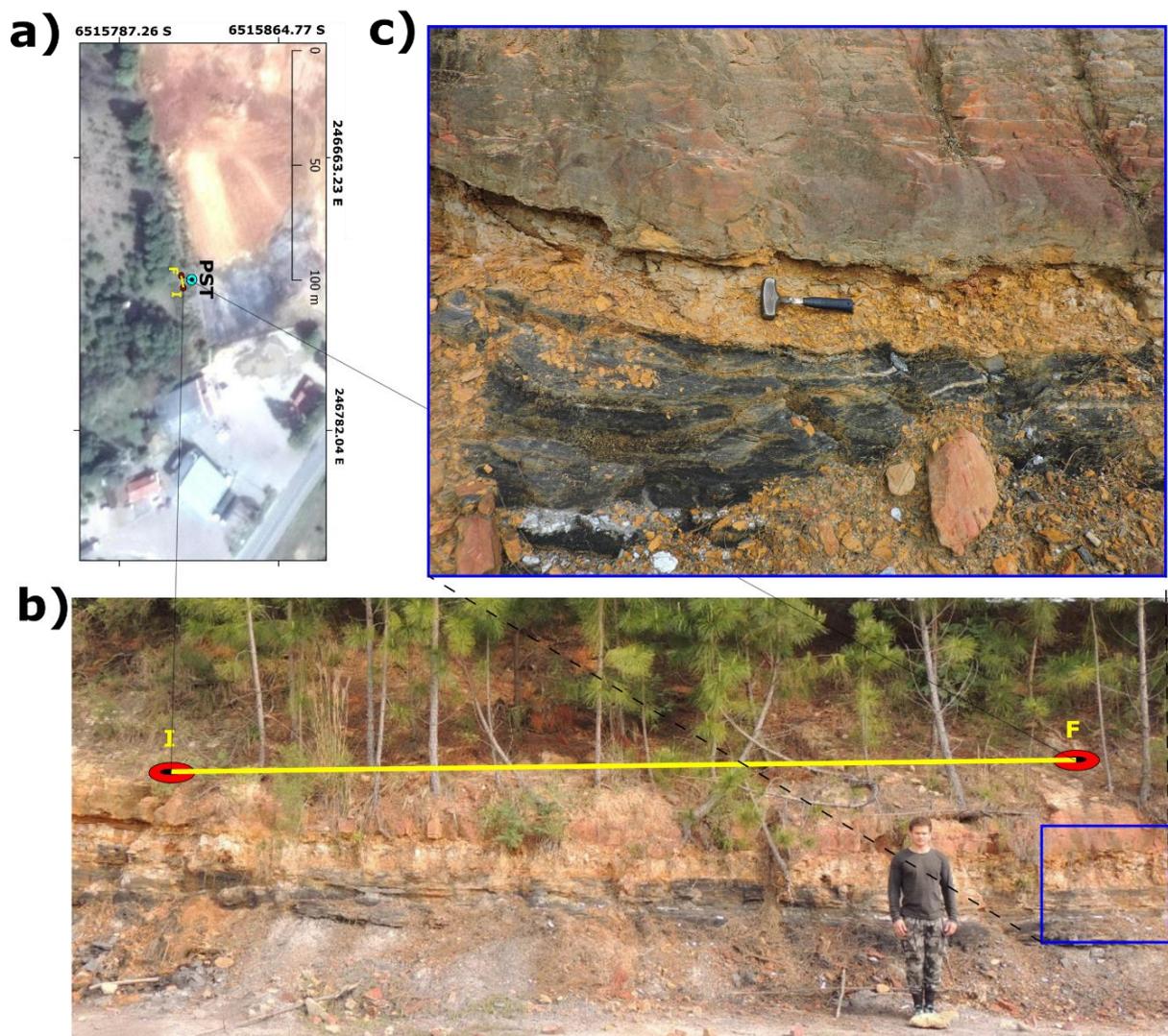
A unidade Gondwana I inclui os pacotes sedimentares que, através de análise litoestratigráfica, caracterizam individualmente o Grupo Itararé e Formação Aquidauana, Grupo Guatá, Grupo Passa Dois e Formações Pirambóia e Sanga do Cabral. Possui constituição predominantemente de sedimentos do Paleozóico e documenta um ciclo transgressivo-regressivo completo, que tem início a partir da base do pacote glacial pensilvaniano, atingindo máximo afogamento na Formação Palermo no Artinskiano, e encerra em depósitos continentais do início do Mesozóico. Vem servindo de acervo para pesquisas há mais de um século, decorrente do interesse exploratório em função da existência de camadas de carvão da Formação Rio Bonito, de ocorrências de urânio nesta mesma unidade e do potencial petrolífero.

Figura 2 – Mapa a) geológico do município de Candiota, b) do local de estudo destacando em c) imagem de satélite o afloramento PST e do perfil de aquisição de dados (*datum*: SIRGAS2000)



Fonte: adaptado da carta geológica Folha Pedro Osório SH.22-Y-C 1:250000 (CPRM, 1999) e Google Earth Pro (2017).

Figura 3 – a) Imagem de satélite destacando o b) Perfil PST e as c) litologias visíveis no afloramento PST



Fonte: próprio autor (2017).

O carvão ocorre na porção meridional da Bacia do Paraná, nas localidades de Bonito, Barro Branco e Candiota, principais unidades de significado na Geologia Econômica para o país. As camadas de carvão na região de Candiota (RS) arranjam-se num padrão retrogradacional (ALVES, 1994 apud MILANI, 2007), sucedendo-se temporalmente de sul para norte segundo a tendência transgressiva que dominava a sedimentação em maior escala.

3.3 Geologia Local

Análises do intervalo estratigráfico da Bacia do Paraná realizadas no trabalho de Holz (2006) em Candiota, indicaram importantes mudanças regionais de nível de base

que geraram três sequências distintas.

A primeira sequência, referente a discordância com o embasamento, é marcada regionalmente pelo contato entre depósitos do Permiano inferior e rochas cristalinas do Neoproterozóico, localmente com rochas metassedimentares da Bacia do Camaquã. A segunda sequência é marcada pelo contato entre sedimentos finos de origem marinha e arenitos fluviodeltaicos. O empilhamento de fácies indica queda relativa do nível do mar, registrada em outros locais pelo estado. A terceira sequência é marcada pela erosão fluvial, presença de lama e arenitos de ambiente marinho superficial.

Na segunda sequência foram definidos quatro ambientes distintos: frente deltaica, *foreshore* (antepraia), *shoreface* (face praial) e *offshore* (marinho). Litoestratigraficamente, é equivalente à Formação Rio Bonito (Holz, 2006), onde, Ramgrab e Wildner (1999) relatam a ocorrência de arenitos finos a muito finos, com estratificação cruzada de pequeno a médio porte, *climbing-ripples* e laminação paralela intercalados com folhelhos, além de camadas de carvão, classificadas por Karlkreuth (2006) através de análise petrográfica, como sub-betuminoso.

3.4 Camadas de Carvão

As camadas de carvão inseridas no topo da Formação Rio Bonito são de caráter uniforme com ampla distribuição espacial em relação a sua espessura. A posição relativa das camadas e das coberturas, segundo o relatório geológico da Folha Pedro Osório (RAMGRAB; WILDNER, 1999), é influenciada por falhas propiciando a ocorrência de extensas áreas com coberturas inferiores a 50 m e entre 50 m e 300 m. Devido à pouca cobertura ganham atenção em caráter exploratório, sendo classificadas em 3 intervalos referentes as suas respectivas coberturas (RAMGRAB; WILDNER, 1999): 2 m (céu aberto), 50-300 m (baixa profundidade) e 300-800 m (média profundidade).

4 TEORIA DO MÉTODO *GROUND PENETRATING RADAR* (GPR)

As informações referentes ao método de *GPR* contidas neste item são, em geral, baseadas nos livros *Near-surface Geophysics*, escrito por Butler (2005), e *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*, escrito por Jol (2009).

4.1 Propriedades Eletromagnéticas dos Materiais

Para o método *GPR*, as propriedades elétricas e magnéticas dos materiais são decisivas para aplicação. As equações constitutivas (Equação 1, 3 e 4) fornecem uma descrição macroscópica de como os elétrons/átomos/moléculas/íons, etc., respondem à aplicação de um campo eletromagnético.

A permissividade elétrica ε (*farads* por metro) indica a proporção entre intensidade de campo elétrico \mathbf{E} e deslocamento de corrente elétrica \mathbf{D} (Equação 1).

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1)$$

Descreve a capacidade de um material armazenar carga elétrica e o seu grau de polarização sob influência de um campo elétrico. Para aquisições com *GPR* são utilizados valores adimensionais relativos ε_r (Equação 2), ou seja, em função da permissividade do vácuo ε_0 (8.89×10^{-12}).

$$\varepsilon_r = \varepsilon / \varepsilon_0 \quad (2)$$

A condutividade elétrica σ (*siemens* por metro) indica a proporção entre densidade de corrente \mathbf{J} e intensidade de campo elétrico \mathbf{E} (Equação 3).

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

Descreve a capacidade de um material permitir a passagem de cargas elétricas através dele mesmo, podendo ser descrita como o inverso da resistividade ρ (*ohm* por metro), capacidade de um material resistir a passagem de carga elétrica por ele mesmo.

A permeabilidade magnética μ (*henrys* por metro) representa a proporção entre intensidade de fluxo magnético \mathbf{B} e o campo magnético induzido \mathbf{H} (Equação 4).

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4)$$

Descreve a orientação dos momentos magnéticos do material. Para aquisições com *GPR* são utilizados valores adimensionais relativos μ_r (Equação 5), ou seja, em função da permeabilidade do vácuo μ_0 ($1,2566 \times 10^{-6}$).

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (5)$$

Devido a maioria dos materiais não possuírem fortes assinaturas magnéticas (momentos magnéticos orientados para mesma direção) o valor relativo é aproximado para o valor de 1.

Na Tabela 1 são comparados valores de permissividade relativa ε_r de alguns materiais, retirados dos trabalhos de Save (2004), Strange (2005) e Shuqui & Zhen (2013).

Tabela 1 – Valores de permissividade elétrica relativa ε_r de alguns materiais encontrados em locais de ocorrência de carvão

Material	Save (ε_r)	Strange (ε_r)	Shuqui & Zhen (ε_r)
Água	81	81	81
Ar	1	1	1
Arenito	3-5	-	-
Carvão	3,5	4,4	2,3-3,6
Folhelo	5-15	9,1	-
Siltito	-	-	5-30

Fonte: adaptado de Save (2004), Strange (2005) e Shuqui & Zhen (2013).

4.2 Natureza Ondulatória do Campo Eletromagnético

Matematicamente a característica ondulatória dos campos eletromagnéticos é descrita através das equações de Maxwell ao eliminar a componente do campo elétrico ou magnético. Em termos do campo elétrico (E), obtém-se a Equação 6.

$$\nabla \times \nabla \times E + \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

Descrita em função da distância de propagação da onda que $\beta = r \cdot k$, onde r é a posição espacial e k a direção de propagação, pode ser rescrita na forma da Equação 7.

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) = 0 \quad (7)$$

Ao considerar a propagação em um meio sem perda ($\sigma = 0$) a Equação 7 pode ser reduzida para a forma na Equação 8.

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) = 0 \quad (8)$$

De modo que a Equação 8 pode ser resolvida em termos de velocidade de propagação, conforme descrito pela Equação 9. Onde a velocidade é descrita em termos da ε e μ do meio (Equação 10), que geralmente é uma simplificação adotada para os materiais geológicos.

$$f(\beta, t) = f(\beta \pm vt) \quad (9)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad (10)$$

Porém, todos os materiais reais exibem alguma perda que é geralmente atribuída a $\sigma > 0$. Com isso a solução da Equação 9 assume a forma da Equação 11.

$$f(\beta, t) \approx f(\beta \pm vt)e^{\pm\alpha\beta} \quad (11)$$

Onde surge um novo termo α dito atenuação, descrito na Equação 12 em termos de σ , ε e μ . De forma que a propagação da onda, Equação 11, pode ser rescrita em função de amplitude (Equação 13).

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (12)$$

$$A = A_0 e^{\alpha\beta} \quad (13)$$

Associado ao conceito de velocidade de onda eletromagnética está o conceito de impedância eletromagnética (Equação 14). A impedância z pode ser entendida por analogia com outros sistemas, como circuitos elétricos ou ondas acústicas, em eletromagnetismo ela representa a oposição do meio à passagem de ondas eletromagnéticas.

$$z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (14)$$

4.3 Propagação de Ondas Eletromagnéticas

Quando uma onda se propaga e encontra certo meio, como um obstáculo ou uma superfície que separa duas regiões (com características diferentes), ocorre interação que desencadeia comportamentos específicos, chamados fenômenos ondulatórios.

O primeiro fenômeno é a reflexão que acontece quando uma onda atinge uma superfície de contato entre dois meios com propriedades distintas e retorna com mesmo ângulo de chegada, se propagando no meio incidente sem alteração de velocidade. Esse fenômeno é descrito através da Lei de Reflexão de Snell (Equação 15).

$$\theta_i = \theta_r \quad (15)$$

Onde θ_i é o ângulo incidente do raio perpendicular à frente de onda, θ_r o ângulo do raio perpendicular à frente de onda refletida.

O segundo fenômeno é a refração que ocorre quando uma onda atinge uma superfície de contato entre dois meios e a atravessa, passando a se propagar no

segundo meio com ângulo e velocidades diferentes do meio incidente. Esse fenômeno é descrito pela Lei de Refração de Snell (Equação 16).

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} \quad (16)$$

Onde V_1 é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio 1, V_2 é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio 2.

O terceiro fenômeno é a difração que ocorre quando uma frente de onda encontra um obstáculo, este faz com que parte da energia seja refletida e outra parte seja transmitida. As ondas refletidas e transmitidas passam a ser novas frentes de ondas que se comportam como pequenas frentes de ondas pontuais. Atua de forma mais intensa quando o obstáculo possui dimensões próximas ao comprimento da onda incidente. Esse fenômeno é descrito através do Princípio de Huygens.

Neste caso as parcelas transmitidas e refletidas são descritas através dos Coeficientes de Transmissão e Reflexão de Fresnel em termos de impedância, respectivamente nas Equações 17 e 18.

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (17)$$

$$\tau = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (18)$$

Onde Z_1 é a impedância eletromagnética do meio 1 e Z_2 é a impedância eletromagnética do meio 2.

4.4 Sinal do GPR

O sinal de GPR é um pulso eletromagnético que possui largura W no domínio do tempo, determinado pela frequência central f_c da antena utilizada para emissão (Equação 19).

$$W = \frac{1}{f_c} \quad (19)$$

A frequência central do equipamento é o valor de frequência com maior amplitude emitido dentre de uma banda de frequências Δf , que varia de um valor mínimo ($f_c/2$) até um máximo ($3f_c/2$).

A partir da frequência central e da velocidade de propagação do pulso no meio é possível calcular o comprimento de onda central λ_c (Equação 20), dito como a métrica do método GPR, pois a partir dele são retiradas informações de resolução da

antena, ou seja, indicativos de quais alvos são capazes de ser “enxergados” pelo equipamento.

$$\lambda_c = \frac{v}{f_c} \quad (20)$$

A resolução do sinal *GPR*, descrita em função do comprimento de onda central, é dividida em duas componentes: vertical *R* e horizontal *H*, apresentadas nas Equações 21 e 22, respectivamente.

$$R \geq \frac{\lambda_c}{4} \quad (21)$$

$$H \geq \sqrt{\frac{\beta \lambda_c}{2}} \quad (22)$$

4.5 Amostragem

As formas de onda de pulsos eletromagnéticos são funções contínuas no tempo e no espaço, de modo que, para adotar medidas de processamento e análise nos computadores os dados precisam ser expressos na forma digital. A função contínua no tempo pode ser representada na forma digital através da amostragem de uma série de valores discretizados em intervalos de tempo regulares.

Para determinar o grau de confiabilidade dos valores digitais é necessário o conhecimento da forma de onda contínua a ser representada. Dessa forma, a partir do Teorema de Nyquist (Equação 23 e 24), é determinado o critério que garante a representatividade da função contínua através da função digital.

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_c} \quad (23)$$

$$\Delta x \leq \frac{v}{2f_c} \quad (24)$$

Onde Δt é a amostragem temporal e Δx a amostragem espacial. Porém para campanhas de *GPR*, recomenda-se que seja adotado um critério mais rigoroso (ANNAN, 2005) representado pelas Equações 25 e 26.

$$\Delta t \leq \frac{1}{6f_c} \quad (25)$$

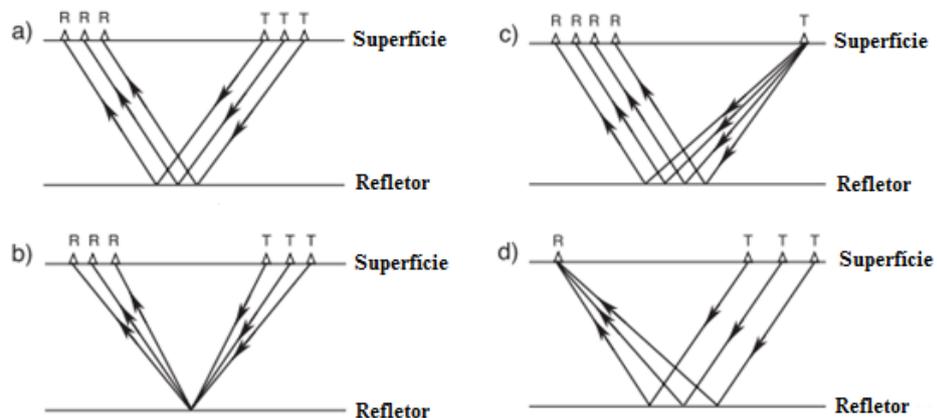
$$\Delta x \leq \frac{v}{6f_c} \quad (26)$$

4.6 Aquisição de dados

À medida que os dados são registrados durante aquisição, os traços de reflexão posicionados horizontalmente constroem o perfil de reflexão do radar, ou também chamado de radargrama.

Os dados de reflexão, geralmente, são adquiridos através de quatro diferentes tipos de arranjo (Figura 4): *common offset* (afastamento comum de fonte e receptor), *common source* (afastamento com fonte comum), *common mid point* (ponto médio comum), *common receiver* (afastamento com receptor comum).

Figura 4 – Tipos de arranjo de aquisição de reflexão: a) afastamento comum de fonte e receptor, b) ponto médio comum, c) afastamento com fonte comum e d) afastamento com receptor comum, onde T e R são respectivamente antenas transmissora e receptora



Fonte: adaptado de Annan (2005).

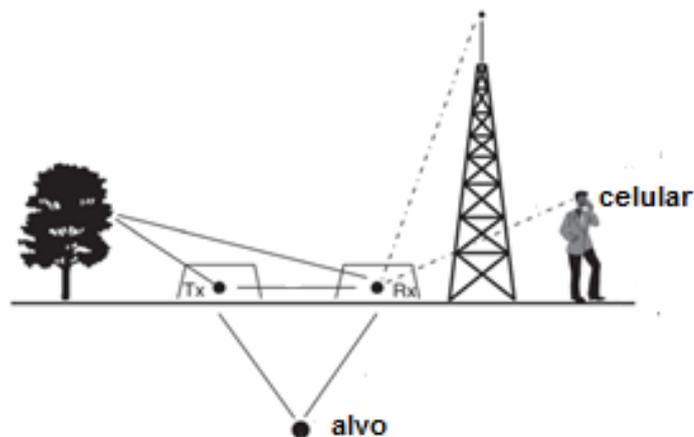
4.7 Ruído e Blindagem

Quase todos os dados geofísicos contem um sinal indesejado (ou ruído) em maior ou menor grau (BURGER; SHEEHAN; JONES, 2006). Esse sinal indesejável é oriundo de fatores não geológicos (como efeito de cabos elétricos de força, vibração do tráfego), da imprecisão instrumental e dos erros na coleta de dados. Assim as campanhas *GPR* também estão sujeitas a ruídos de natureza sistemática (imprecisão instrumental) ou aleatória (fatores não geológicos).

Os sistemas *GPR* são essencialmente receptores de banda larga e, portanto segundo Annan (2005), são suscetíveis a interferências de várias fontes externas (Figura 5).

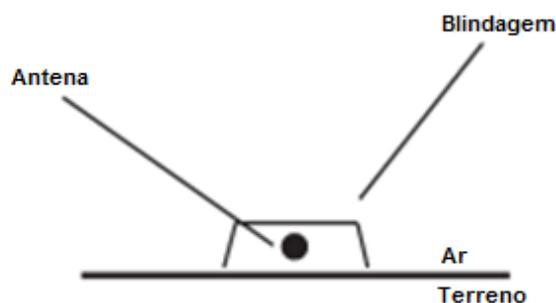
Nesse caso, a blindagem das antenas (Figura 6) atua como um filtro de uma determinada banda de frequência, suprimindo as demais frequências, o que por sua vez implica na diminuição de energia oriunda da onda direta da transmissora (onda aérea) e de fontes de campos eletromagnéticos próximas, além de promover o aumento do foco de emissão de sinal.

Figura 5 – Fontes externas de ruído de dados de *GPR*, onde Tx e Rx são respectivamente antenas transmissora e receptora



Fonte: adaptado de Annan (2005).

Figura 6 – Esquema ilustrativo da blindagem de uma antena de *GPR*



Fonte: adaptado de Annan (2005).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Determinação do Local de Pesquisa

A escolha do local que oferecesse as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho foi realizada através de um levantamento, via sensoriamento remoto, de possíveis locais com potencial para pesquisa.

Para este levantamento foram utilizadas imagens de satélite disponíveis no *software Google Earth Pro* (desenvolvido pela *Google LLC*) em conjunto com a carta geológica Folha Pedro Osório SH.22-Y-C (1:250000) de autoria de Ramgrab e Wildner (1999), disponível no *site* da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

O local escolhido deveria contemplar a unidade estratigráfica Formação Rio Bonito contendo o conjunto em exposição de camadas de carvão, alvos da exploração no município de Candiota, e litologias comumente encontradas sobre essas camadas. Ao mesmo tempo o local deveria oferecer condições para posicionar alvos (vigas metálicas) nas regiões de contato entre as litologias aflorantes.

A partir da definição de locais com potencial para pesquisa, foi realizada uma saída de campo para verificação dos mesmos. Ao final do primeiro contato com esses locais, foi verificado que o afloramento PST contemplou todos os requisitos predefinidos, tornando-o assim o local ideal para aquisição de dados utilizados neste trabalho.

5.2 Desenvolvimento de Mapas Geológicos e de Localização

Após a escolha do local de aquisição de dados foram desenvolvidos os mapas geológicos e de localização da área de estudo.

A localização e altitude do afloramento (e perfil locado sobre ele) foram determinadas através do sistema de posicionamento global (*GPS*) RTK. A confecção dos mapas foi através do *software* livre de sistema de georreferenciamento *QGIS* (mantido pela *Open Source Geospatial Foundation*) em conjunto com a base de arquivos vetoriais da CPRM, imagens de satélite disponíveis no *Google Earth Pro* e a carta geológica Folha Pedro Osório SH.22-Y-C (1:250000).

5.3 Descrição Faciológica do Afloramento

O conceito adotado para a descrição faciológica neste trabalho é retirado do capítulo 2 do livro *Facies Model 4*, escrito por James & Dalrymple (2010). O autor descreve Fácies como um corpo de rocha caracterizado por uma combinação particular de litologia, estruturas físicas e/ou biológicas que conferem um aspecto diferenciável dos corpos de rocha acima, abaixo e lateralmente adjacentes. Para a interpretação das Fácies descritas, foram utilizadas informações contidas na tabela

de descrição litofaciológica de assinaturas estratigráficas da Bacia do Paraná, publicado num artigo de Holz (2006).

5.4 Estimativa de Velocidade de Onda Eletromagnética

O eixo vertical de um radargrama representa o tempo duplo de percurso da onda eletromagnética no meio, ou como é conhecido o *Two-Way-Traveltime* (*TWT*). O *TWT* é a resposta do tempo em que a onda chega ao refletor e retorna a antena receptora.

Após a compreensão do conceito de *TWT*, para a interpretação de dados *GPR*, é necessário que seja feita a conversão da janela no domínio do tempo e para o domínio do espaço. Essa conversão é feita através da estimativa da velocidade em que a onda percorre o meio ao ser transmitida pela fonte e captada pelo receptor. Segundo Daniels (2004) e Jol (2009) a estimativa da velocidade da onda do *GPR* pode ser realizada por diversos métodos, sendo os três principais listados como:

- Medidas laboratoriais da constante dielétrica e da condutividade, para determinar a velocidade de propagação da onda no meio;
- Posicionamento de um objeto conhecido em profundidade pré-determinada para medir o tempo de viagem de duas vias;
- Medida do ângulo de largura usando a antena do transmissor-receptor em diferentes afastamentos (análise de velocidade em ponto comum).

O segundo método, de posicionamento de um objeto como alvo, é descrito no trabalho de Conyers e Lucius (1996) através de um teste realizado com duas barras de ferro, com 2 *cm* de diâmetro cada, posicionadas em uma profundidade de 1,10 *m* em diferentes locais de um perfil adquirido em uma campanha arqueológica.

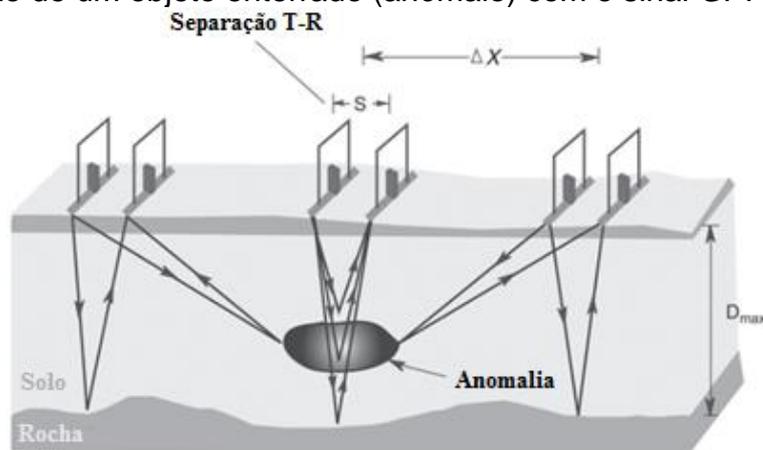
A velocidade da onda eletromagnética é a resposta das propriedades que ela atravessa, a variação de propriedades implica na variação de velocidade da onda, que por sua vez, implica na sua reflexão. A barra de ferro, com velocidade de propagação de onda superior (anômala) a dos sedimentos, produziu reflexões com feições hiperbólicas na seção *GPR* tornando-a distinguível dos estratos.

Neste trabalho os autores, Conyers e Lucius (1996), ressaltam que o teste com a barra foi capaz de fornecer as melhores estimativas de velocidade e permissividade elétrica para as camadas investigadas. Os autores recomendam que o alvo seja de composição metálica, para maximizar a reflexão, e que seja utilizada uma janela de amostragem (no tempo) que seja capaz de representar uma profundidade duas vezes

maior que a profundidade em que o objeto esteja enterrado, também recomendam que a orientação das antenas seja paralela a orientação da barra utilizada como alvo.

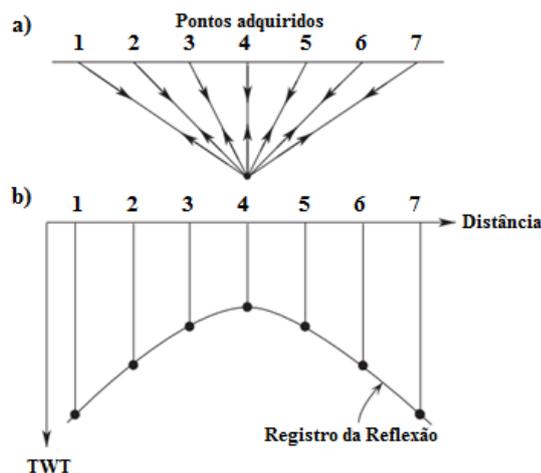
Na Figura 7 é apresentado um esquema, retirado do capítulo 11 do livro *Near-Surface Geophysics*, escrito por Annan (2005), que demonstra a interação de um objeto enterrado (anômalo) com o sinal GPR, enquanto na Figura 8 é apresentado um esquema, retirado de um artigo de Neal (2004), explicando a característica hiperbólica resultante dessa interação.

Figura 7 - interação de um objeto enterrado (anômalo) com o sinal GPR



Fonte: adaptado de Annan (2005).

Figura 8 – a) pontos adquiridos na aquisição e b) o registro no tempo dos pontos adquiridos (traços)

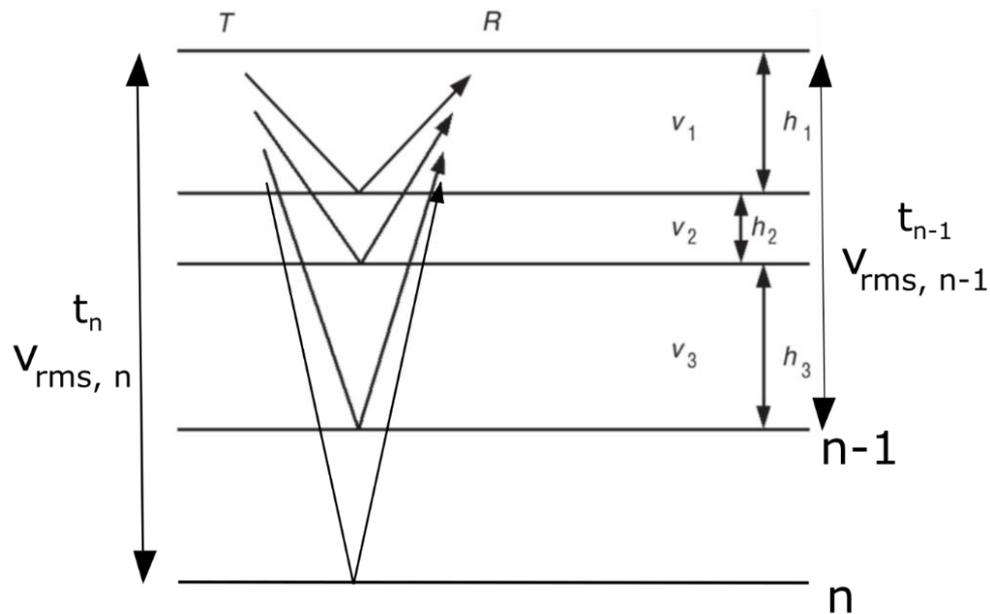


Fonte: adaptado de Neal (2004).

5.5 Correção de Dix

Num modelo de subsuperfície simplificado (Figura 9) as camadas possuem variações bem definidas de espessura (h) e de velocidade (v), porém as reflexões ocorrem em função da variação de intervalos (n) entre as camadas.

Figura 9 – Modelo de subsuperfície com diferentes espessuras e velocidades



Fonte: adaptado de Annan (2005).

A informação de velocidade da onda refletida é referente ao pacote total de camadas até o intervalo causador da reflexão. Esse valor de velocidade do pacote é chamado de velocidade aparente (v_{rms}), e a partir da Equação de Dix (Equação 27), pode ser convertido em valores de velocidade das camadas que compõe esse pacote, chamadas de velocidades intervalares (v_{int}).

$$v_{int} = \sqrt{\left[\frac{(v_{rms,n})^2 t_n - (v_{rms,n-1})^2 t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right]} \quad (27)$$

5.6 Dados GPR

Os dados de GPR utilizados neste trabalho foram adquiridos com uma antena com frequência central de 200 MHz (Figura 10), que consiste em dois dipolos biestáticos blindados, desenvolvida pela empresa italiana © *Ingegneria Dei Sistemi* (IDS) e fornecido pela Universidade Federal do Pampa. O arranjo adotado para as aquisições foi o afastamento comum de fonte e receptor (*Common Offset*), com a orientação de antenas paralelas entre si e paralelas a orientação das barras.

Foram realizadas, no total, cinco aquisições no Perfil PST (Tabela 2). A primeira aquisição (aa') foi feita sem alvos de controle, a segunda (bb') e a terceira (cc') foram feitas utilizando as barras de ferro como alvos, a quarta (dd') e a quinta (ee') foram

feitas utilizando as barras de aço. Todas as aquisições foram feitas utilizando os mesmos parâmetros de janela de aquisição, taxa de amostragem espacial (Δx) e taxa de amostragem temporal (Δt).

Figura 10 – Antena IDS de 200 MHz utilizada neste estudo



Fonte: próprio autor (2017).

Tabela 2 – Aquisições realizadas no Perfil PST

Nome	Alvos	Janela (ns)	Amostras	Traços	Δx (m)	Δt (ns)
aa'	Ausente	100	384	200	0,0278	0,2604
bb'	Barra de Ferro	100	384	187	0,0278	0,2604
cc'	Barra de Ferro	100	384	193	0,0278	0,2604
dd'	Barra de Aço	100	384	190	0,0278	0,2604
ee'	Barra de Aço	100	384	210	0,0278	0,2604

Fonte: próprio autor (2017)

5.7 Posicionamento dos Alvos

O posicionamento dos alvos (Figura 11) foi determinado a partir da mudança de fácies identificadas no afloramento PST. O primeiro alvo foi posicionado à cerca de 1,81 m do ponto inicial do perfil PST à 0,75 m de profundidade, onde pela descrição do afloramento encontra-se o contato entre os dois primeiros estratos. O segundo alvo foi posicionado cerca de 2,61 m do ponto inicial do perfil a 1,10 m de profundidade,

onde encontra-se o contato entre as o contato entre o segundo e o terceiro estrato (topo da camada portadora de carvão).

Como alvos foram utilizados: duas vigas de aço, com 2 *cm* de diâmetro e 1,30 *m* de comprimento; duas vigas de ferro, com 1 *cm* de diâmetro e 1,20 *m* de comprimento.

Figura 11 – Alvo (viga de ferro) sendo posicionado no contato entre os dois primeiros estratos.



Fonte: próprio autor (2017).

5.8 Controle do Sinal

Os parâmetros adotados para aquisição da seção foram submetidos a testes de controle de qualidade em relação aos critérios de amostragem do item 4.5. O resultado desse controle é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Controle de qualidade das aquisições de dado (para $v = 0,1 \text{ m/ns}$)

Nome	$\Delta t \text{ (ns)}$	$\frac{1}{6f_c} \text{ (ns)}$	Δt satisfatório	$\Delta x \text{ (m)}$	$\frac{v}{6f_c} \text{ (m)}$	Δx satisfatório
aa'	0,2604	0,8333	Sim	0,0278	0,0833	Sim
bb'	0,2604	0,8333	Sim	0,0278	0,0833	Sim
cc'	0,2604	0,8333	Sim	0,0278	0,0833	Sim
dd'	0,2604	0,8333	Sim	0,0278	0,0833	Sim
ee'	0,2604	0,8333	Sim	0,0278	0,0833	Sim

Fonte: próprio autor (2017).

A partir da informação de frequência central, é possível verificar a métrica do equipamento (comprimento de onda) para obter informações prévias da resolução do sinal.

As Equações 28, 29, 30, 31 apresentam os cálculos para verificação da métrica do sinal adotando a velocidade do meio (v) como $0,1 \text{ m/ns}$, o que é uma aproximação razoável para maioria dos meios geológicos, e uma profundidade de $0,5 \text{ m}$.

$$f_c = 200 \text{ MHz} \quad \therefore \quad f_{min} = 100 \text{ MHz}, \quad f_{max} = 300 \text{ MHz} \quad (28)$$

$$\lambda_c = \frac{v}{f_c} = 0,5 \text{ m}, \quad \lambda_{min} = \frac{v}{f_{max}} = 0,33 \text{ m}, \quad \lambda_{max} = v/f_{min} = 1 \text{ m} \quad (29)$$

$$R_c = \frac{\lambda_c}{4} = 0,125 \text{ m}, \quad R_{max} = \frac{\lambda_{min}}{4} = 0,0825 \text{ m}, \quad R_{min} = \frac{\lambda_{max}}{4} = 0,25 \text{ m} \quad (30)$$

$$H_c = \sqrt{\beta\lambda_c/2} = 0,35 \text{ m}, \quad H_{max} = \sqrt{\beta\lambda_{min}/2} = 0,28 \text{ m}, \quad H_{min} = 0,5 \text{ m} \quad (31)$$

Onde f_{min} e f_{max} são os valores das extremidades da banda de frequência central da antenna, λ_{min} o comprimento de onda mínimo emitido, λ_{max} o comprimento de onda máximo emitido, R_{max} a resolução máxima do equipamento, referente a menor distância que pode ser “enxergada” entre refletores, e R_{min} a resolução do maior comprimento de onda emitido. Sendo assim, espera-se que a partir do equipamento seja possível diferenciar horizontes de até $12,5 \text{ cm}$ de espessura e alvos de até 28 cm de largura.

5.9 Dados Topográficos

A variação topográfica do Perfil PST foi realizada com Estação Total, equipamento utilizado na medida de ângulos e distâncias em pontos predeterminados, fornecida pela Universidade Federal do Pampa. A determinação dos pontos medidos foi feita em função da morfologia do perfil PST.

5.10 Processamento de Dados GPR

Nesta fase é importante avaliar a necessidade (ou não) da aplicação de cada etapa de um fluxo de processamento.

Em termos práticos, o processamento é realizado para aumentar a razão sinal/ruído para possibilitar a extração de características geométricas e propriedades físicas presentes no meio investigado. A quantidade de processamento empregado num determinado conjunto de dados é feita em função da qualidade dos dados brutos, especificações da campanha e limitações logísticas de tempo/custo do projeto.

Jol (2009) ressalta que quanto mais sofisticada a técnica de processamento (mais etapas) haverá mais chances de introduzir artefatos matemáticos ou carregar

tendências nos dados refinados. Logo, o processamento não pode ser inteiramente objetivo.

A capacidade de um processador de fazer as escolhas corretas é tão importante quanto a eficácia dos algoritmos de processamento na determinação da qualidade final da imagem. A escolha de filtros e parâmetros utilizados no processamento deve ser estabelecida caso a caso, a depender do tipo de rocha e/ou condições do terreno e do dado adquirido. Neste caso o processador de dados é confrontado por três tarefas principais (YILMAZ, 1987 apud ANNAN, 2005):

- Selecionar a sequência apropriada de etapas para o processamento;
- Escolher um conjunto apropriado de parâmetros para cada etapa de processamento;
- Avaliar a saída de cada etapa de processamento, identificando problemas causados por seleção incorreta de parâmetros.

5.10.1 Filtragem

Os filtros são projetados para alterar a forma dos traços individuais através de manipulação matemática, aprimorando ou eliminando determinados recursos. Existem essencialmente dois tipos de filtros: os filtros temporais que atuam verticalmente e são aplicados em traços individuais, geralmente no domínio da frequência; e os filtros espaciais que atuam também em relação à posição horizontal no conjunto total de traços, geralmente no domínio do número de onda (ANNAN, 1998 apud NEAL, 2004).

Em ambos os casos, a filtragem deveria preservar o caráter principal das reflexões primárias, embora implique na diminuição da resolução vertical, melhorando sua visibilidade e continuidade.

5.10.2 Ganho

Os sinais de radar são atenuados à medida que se propagam no meio. Um ambiente de baixa atenuação permite a exploração em profundidades de até dezenas de metros. Em condições de alta atenuação, a profundidade de penetração do sinal pode ser inferior a poucas unidades de metros (ANNAN, 1998 apud NEAL, 2004).

Os sinais que atingem maiores profundidade possuem amplitudes pequenas em comparação com sinais de menor profundidade. Portanto, a amplificação do sinal deve ser feita em função da profundidade, quando continuidade dos horizontes for de interesse central (ANNAN, 2005).

A aplicação do ganho é útil para a exibição de dados e agindo mas também tem o efeito indesejável de amplificar vários tipos de ruído ambiental e sistemático (YILMAZ, 2001 apud NEAL, 2004), embora muitas vezes é desejável mostrar todas as informações registradas em traços, independentemente da amplitude (ANNAN, 1999 apud NEAL 2004).

Para preservar as amplitudes relativas, o ganho pode ser aplicado dentro dos limites definidos pelo usuário, levando em conta a decomposição do sinal devido à dissipação exponencial de energia e perda por distribuição geométrica da frente onda (ANNAN, 1998 apud NEAL, 2004).

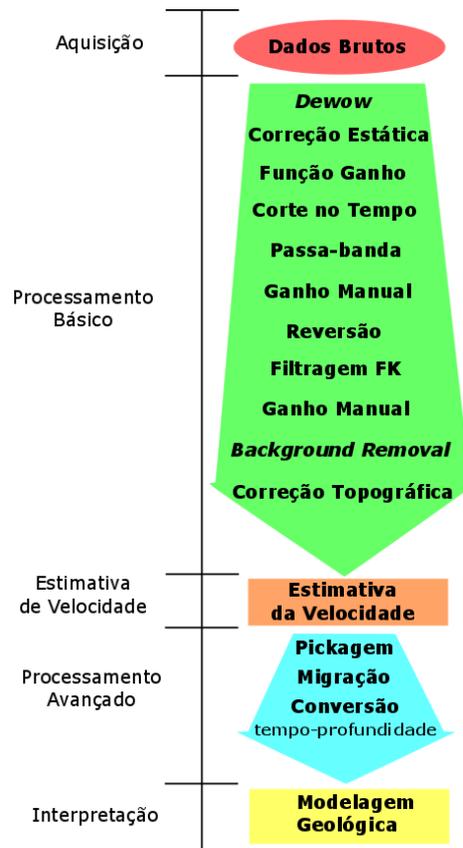
5.10.3 Processamento Aplicado

As etapas de processamento adotadas para este trabalho são apresentadas em forma de fluxograma (Figura 12). Para o controle de qualidade destas etapas, cada item do processamento é apresentado e discutido de forma individual através do conjunto de radargramas e espectros de potência.

Para o processamento e geração de radargramas foi utilizado o *software ReflexW*, desenvolvido pela empresa alemã ©*Sandmeier Geophysical Research*. Para o controle de etapas de processamento foram gerados espectros de potência em conjunto com os radargramas, para isso foi utilizado o *software Prism2*, desenvolvido pela empresa letã *Radar Systems, Inc*.

Abaixo são descritas cada etapa do processamento a partir do manual do *software ReflexW* e do Capítulo 11 do livro *Near-Surface*, escrito por Annan (2005).

Figura 12 – Fluxograma das etapas de processamento aplicadas aos dados



Fonte: próprio autor (2017).

5.10.3.1 Dewow

A primeira etapa de processamento dos dados de *GPR*, o *dewow*, é um filtro de altas frequências que atua na retirada da saturação do sinal, causada por bandas de baixa frequência, mantendo fidelidade aos valores de banda da frequência central da antena utilizada. Como parâmetro de entrada no *software* de processamento é utilizada uma janela de tempo.

5.10.3.2 Correção Estática

Também chamada de correção de tempo-zero, esta etapa é feita para correção do tempo da primeira quebra em uma seção de reflexão do *GPR*. Essa correção é feita através do movimento do conjunto total de traços para cima ou para baixo pela quantidade necessária de TWT. Como tal, deve-se ter cuidado para garantir que a correção tempo-zero produza resultados consistentes em todos os traços.

5.10.3.3 Função Ganho

Função sistematicamente aplicada ao dado *GPR* que possui um operador matemático específico definido pelo usuário ou pelo sistema automaticamente. Neste caso a função adotada para a terceira etapa possui uma parcela linear e uma parcela exponencial. Os valores dessas parcelas são obtidos através de testes de verificação do traço exemplo.

5.10.3.4 Corte no Tempo

A quarta etapa, corte no tempo, limita cada traço a um tempo máximo predefinido possibilitando a separação de partes da janela que carreguem mais ruído do que sinal.

5.10.3.5 Passa-banda

Este filtro atua em cada traço de forma independente. Projetado para a supressão de interferências oriundas de componentes de baixa frequência e de alta frequência do sinal. Os valores de frequência podem ser definidos manualmente ou dentro do espectro de frequência do traço.

O algoritmo utilizado compreende três etapas: aplicação de FFT direta (transformada rápida de Fourier) para transição do domínio do tempo para o domínio da frequência, supressão de componentes de baixa frequência e alta frequência de um espectro de rastreamento e aplicação de FFT reversa para transição do domínio de frequência no domínio do tempo.

5.10.3.6 Ganho Manual

Essa opção de ganho permite definir de forma interativa uma curva de ganho digitalizada na direção y (eixo do tempo) e aplicar essa curva de ganho nos dados. Atua para enfatizar os intervalos de tempo, onde, por exemplo, as estruturas são assumidas. Como parâmetros de entrada no *software* são necessários o tempo no traço exemplo e o valor do ganho em escala logarítmica (dB).

5.10.3.7 Reversão

Procedimento usado para o rearranjo de traços de trás para frente, ou seja, o primeiro traço torna-se o último. Isso pode ser útil quando diferentes aquisições, ao longo de um perfil, é coberto, são feitas em direções opostas.

5.10.3.8 Filtragem FK

A seção 2D (radargrama) é tanto uma função do tempo quanto do espaço (distância). Enquanto a frequência é uma contagem do número de picos dentro de uma unidade de tempo, o número de onda de um evento é determinado contando o número de picos dentro de uma distância unitária ao longo do eixo horizontal. O filtro FK é eficaz na supressão de ruídos com velocidades específicas no conjunto de dados.

5.10.3.9 *Background Removal*

Sob algumas condições, o sinal *GPR* passa a ter “ruído de fundo” (*background*) que pode ser visto no perfil como linhas horizontais com intensidade e a posição fixa no tempo e podem ocultar reflexões reais. Neste caso é aplicada “remoção de ruído de fundo” (*background removal*).

Esta etapa consiste no seguinte algoritmo: subtração do traço médio do perfil, obtido por soma e normalização, de cada traço do perfil original. O uso da remoção de ruído de fundo é eficaz para permitir sinais sutis e mascarados tornem-se visíveis em uma seção processada.

Os parâmetros de entrada no *software* são: o número de traços utilizados para o cálculo da média (número total de traços) e janela de tempo para aplicação da normalização.

5.10.3.10 Correção Topográfica

Os dados coletados no campo não levam em consideração a variação topográfica ao longo do perfil de aquisição. A menos que o conjunto de dados seja

coletado em um nível, superfície plana, é necessária alguma correção topográfica para posicionar os dados no contexto espacial correto.

Devido à profundidade rasa de exploração do *GPR*, a compensação da topografia através de uma amostragem que assegure a contabilização de todas as quebras significativas na inclinação é extremamente importante (NEAL, 2004).

5.10.3.11 *Pickagem*

Processo de seleção de chegadas de sinal no radargrama onde são definidos os refletores de interesse para agregar parâmetros, por exemplo a velocidade de propagação de onda, possibilitando a geração de modelos 2D de velocidade.

5.10.3.12 Migração

Esta etapa visa recuperar as relações geométricas dos eventos de reflexão dos refletores trazendo-os para suas reais posições no eixo temporal e no espacial. O método de migração utilizado neste trabalho foi o de Kirchhoff, uma soma ponderada para cada ponto da seção sobre uma hipérbole calculada a partir da largura de banda predefinida (total de traços da seção).

5.10.3.13 Conversão tempo-profundidade

Etapa que converte seções migradas do domínio do tempo para o domínio do espaço. Esse procedimento é realizado a partir do modelo de velocidade 2D representativo da seção de radar.

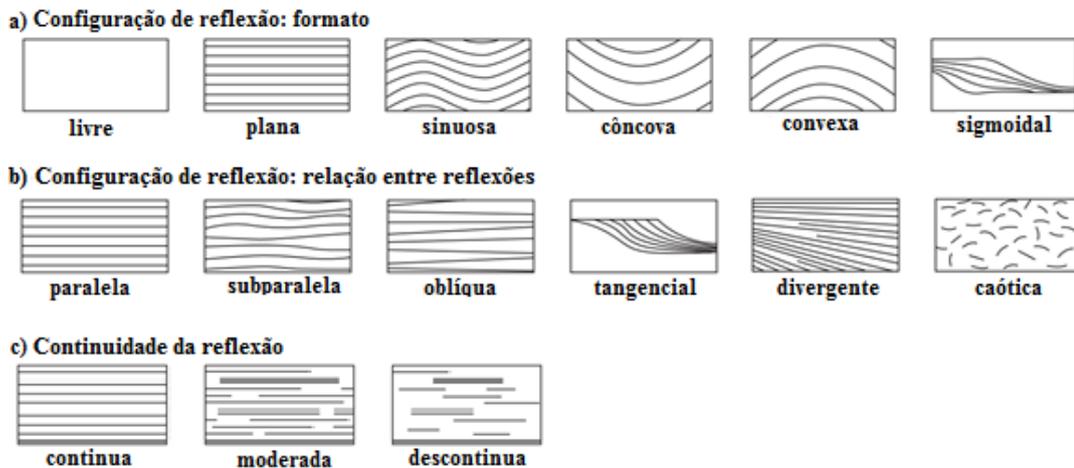
5.11 Interpretação

Para interpretação dos radargramas e determinação de radarfácies são adotados os princípios da sismoestratigrafia, que ao serem aplicados em seções de *GPR* dão origem ao termo “radar estratigrafia”, segundo Neal (2004) descrito pela primeira vez por Jol e Smith (1991) e estabelecido como fundamento de descrição por Gawthorpe (1993).

Neste caso as configurações de reflexão (Figura 13) são caracterizadas em radarfácies de acordo com lista abaixo:

- Formato da reflexão
- Profundidade da reflexão
- Relação entre as reflexões
- Continuidade da reflexão

Figura 13 – Configuração geométrica de a) formato, b) relação e c) continuidade de refletores.



Fonte: adaptado de Neal (2004).

5.12 Tratamento de Imagem

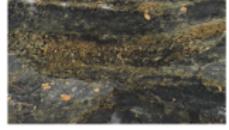
Para a adaptação de figuras e edição de imagens foi utilizado o *software* livre *Inkscape*, desenvolvido pela *The Inkscape Team*, que utiliza o método vetorial para gerar imagens, caminhos de pontos com coordenadas definidas, de forma transparente ao usuário

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Descrição Faciológica

Neste item são apresentados os resultados de descrição das Fácies do aforamento PST (Tabela 4). A partir da correlação com Fácies descritas por Holz (2006), puderam ser atribuídas interpretações dos ambientes de formação de cada Fácies.

Tabela 4 – Relação de Fácies descritas no afloramento PST e a interpretação do ambiente de formação, segundo Holz (2006)

Fácies	Nome	Descrição	Interpretação
	C	Arenito médio a grosso, coloração avermelhada, estratificação subparelela, grãos com alto grau de oxidação	Ambiente com alternância de energia de fluxo sob influência de ondas
	B	Siltito, coloração amarelada, acamamento lenticular, alto grau de intemperismo	Ambiente de baixa energia com deposição de sedimentos em suspensão
	A	Carvão, coloração de cinza escuro a preta, lentes de carbonatos, acamamento lenticular	Acumulação agradacional de matéria orgânica e grãos detríticos finos

Fonte: próprio autor (2017) e Holz (2006).

6.2 Dados Topográficos

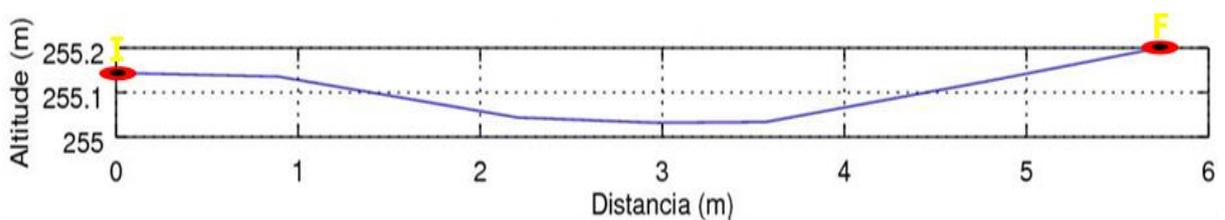
A variação topográfica obtida através da Estação Total foi aplicada a medida de cota adquirida pelo aparelho RTK. No total foram adquiridas sete estações (Tabela 5), expressas em termos de altitude e representadas graficamente na Figura 14.

Tabela 5 – Estações com a variação topográfica do perfil PST

Estação	Distância (m)	Altitude (m)
1	0,00000	255,144
2	0,88890	255,136
3	2,20360	255,044
4	2,97474	255,032
5	3,56979	255,034
6	4,80594	255,127
7	5,71329	255,199

Fonte: próprio autor (2017).

Figura 14 – Perfil de variação topográfica do perfil PST



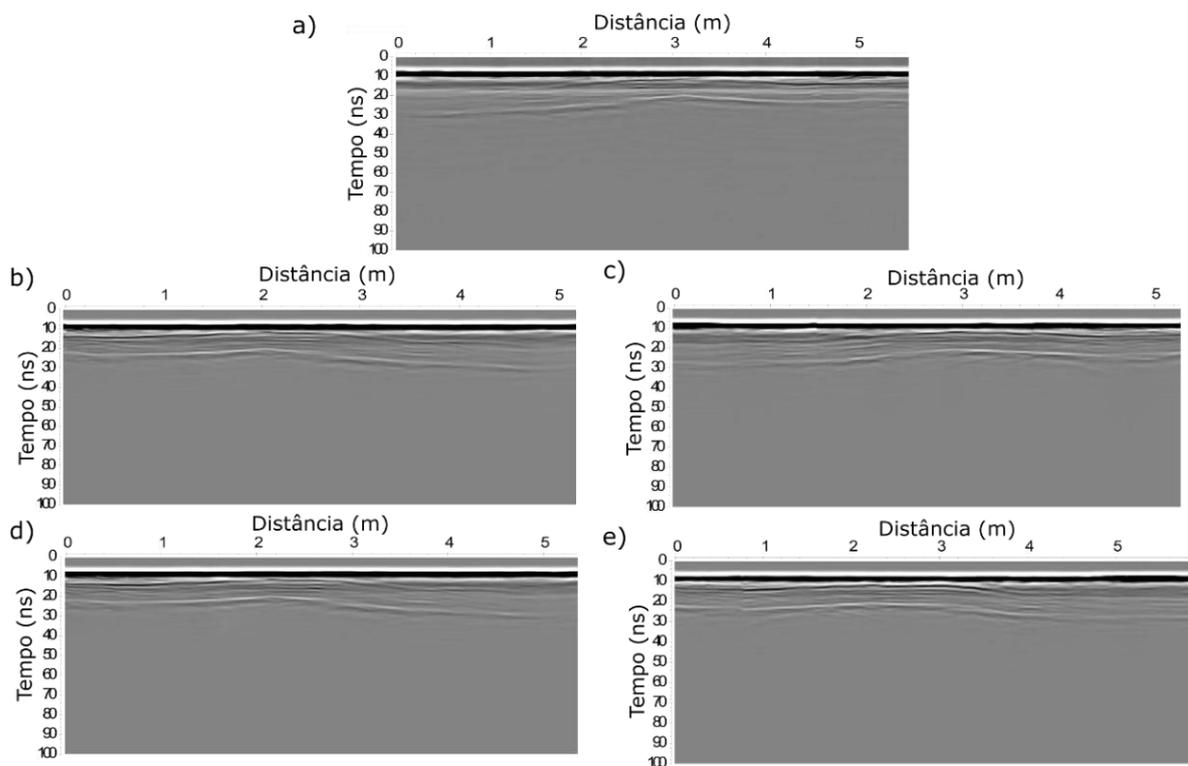
Fonte: próprio autor (2017).

6.3 Dados GPR

6.3.1 Dados Brutos

A partir da aquisição de dados *GPR* foram gerados radargramas dos dados brutos, apresentados na Figura 15, para aplicação do fluxograma de processamento.

Figura 15 – Radargramas de dados brutos das seções a) aa', b) bb', c) cc', d) dd' e e) ee'



Fonte: próprio autor.

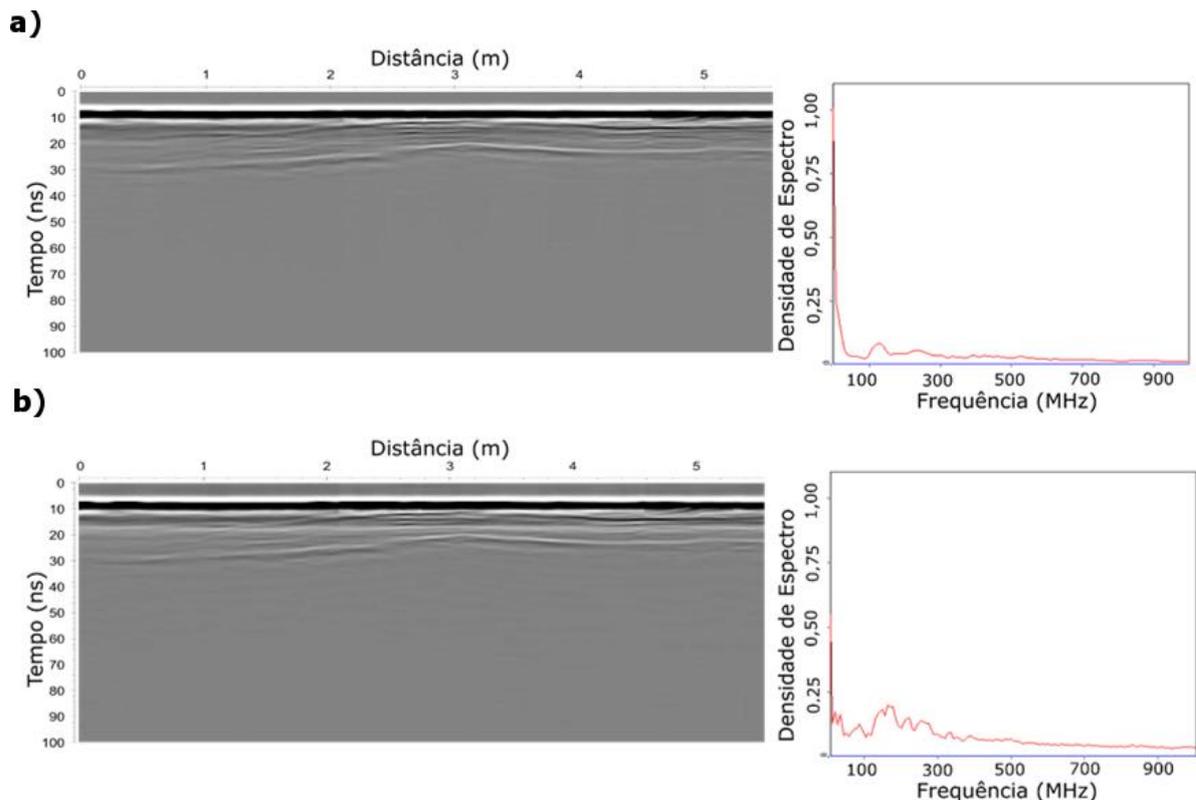
6.3.2 Dewow

O valor inicial adotado para a janela de tempo é o mesmo do tempo da primeira quebra do traço utilizado como exemplo, neste caso 10 *ns*, porém são adotados valores acima e abaixo para teste de qualidade. Entretanto, o valor adotado inicialmente de 10 *ns* mostrou melhoras nos dados.

Na Figura 16 são apresentados a seção aa' antes e após o *dewow* e seu respectivo espectro de potência.

Ao observar a Figura 16b notou-se que a densidade do espectro aumentou para frequências dentro da banda central (entre 100 e 300 MHz) e em resposta disso o sinal a partir de 30 ns imperceptível nos dados brutos, ganha visibilidade no radargrama filtrado.

Figura 16 – Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois da aplicação do *dewow*



Fonte: próprio autor (2017)

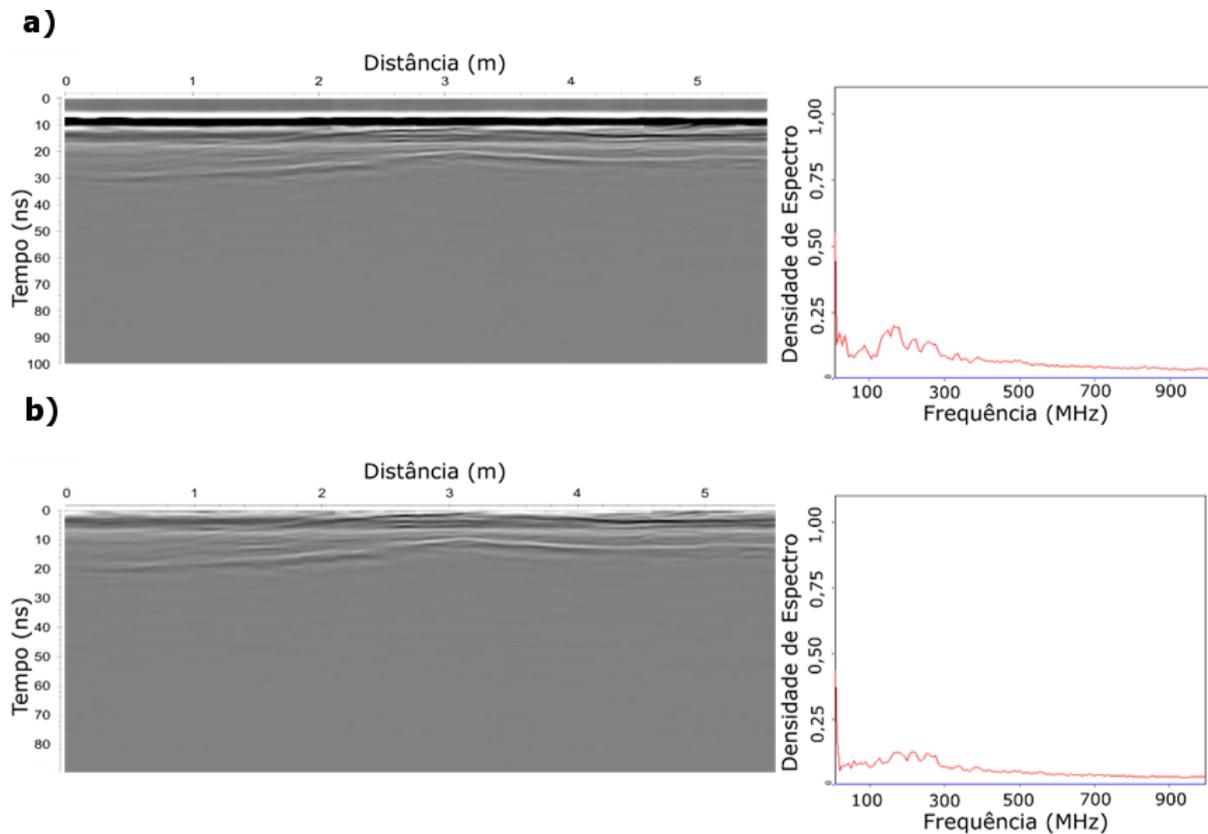
6.3.3 Correção Estática

Como parâmetro de entrada foi adotado o tempo final da primeira quebra do traço exemplo, 10,23 ns, representado no radargrama como o final da fase negativa do primeiro refletor reto de maior amplitude. Na Figura 17 são apresentadas, para comparação, as seções antes e depois da segunda etapa de processamento.

Ao observar a Figura 17b foi verificado que há diminuição na densidade do espectro de potência.

A diminuição observada ocorre como consequência da retirada da onda área, sinal direto da antena transmissora para receptora, que agrega alto valor de energia ao sistema.

Figura 17 - Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois da aplicação da correção estática



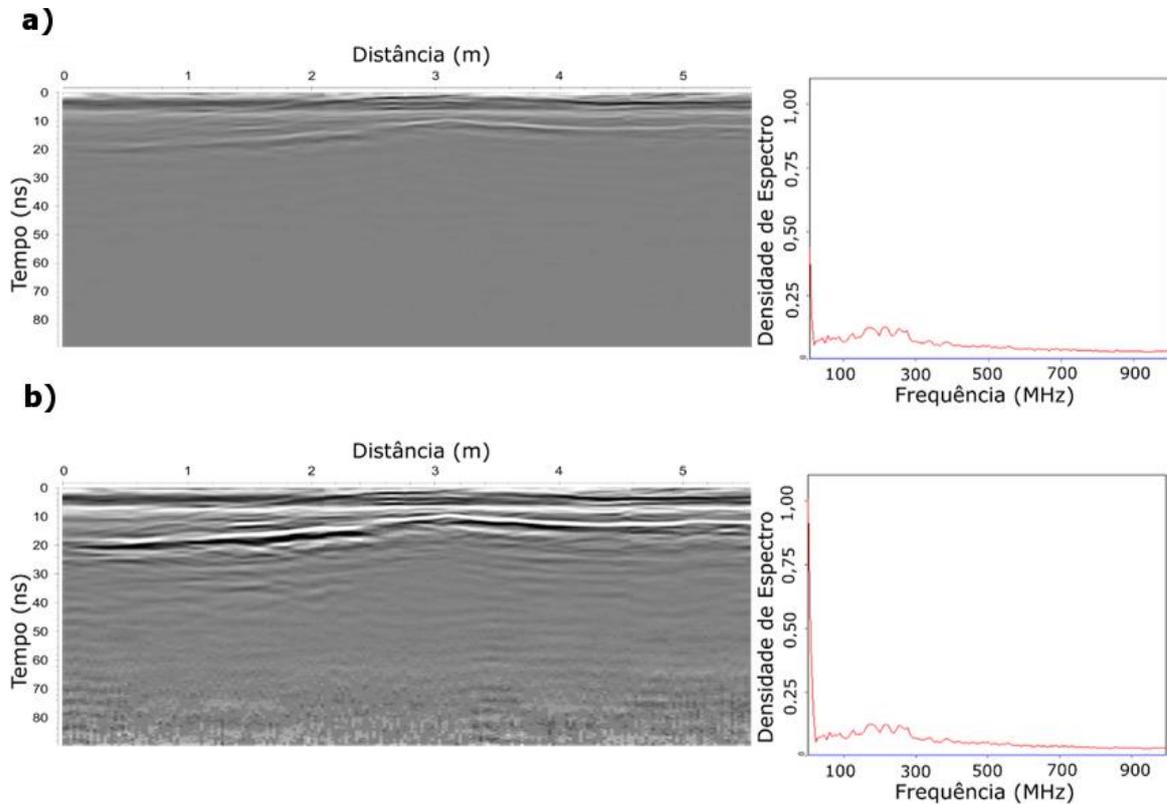
Fonte: próprio autor (2017).

6.3.4 Função Ganho

Como resultado de parâmetros que melhor se ajustaram ao dados para a função ganho, foram obtidos os valores de 0,3478924 para a parcela linear e 3,962711 para a parcela exponencial. Na Figura 18 são apresentadas as seções antes e após a aplicação da função ganho.

Através de análise das imagens da Figura 18b é possível notar que a função adotada evidenciou refletores abaixo em tempos superiores a 30 ns, porém é verificado que a partir do *TWT* de 60 ns o sinal torna-se muito ruidoso (reflexões horizontalizadas), de modo que a parcela de sinal referente a este intervalo não carrega informações úteis para o desenvolvimento do trabalho.

Figura 18 - Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois da aplicação da função ganho



Fonte: próprio autor (2017).

6.3.5 Corte no Tempo

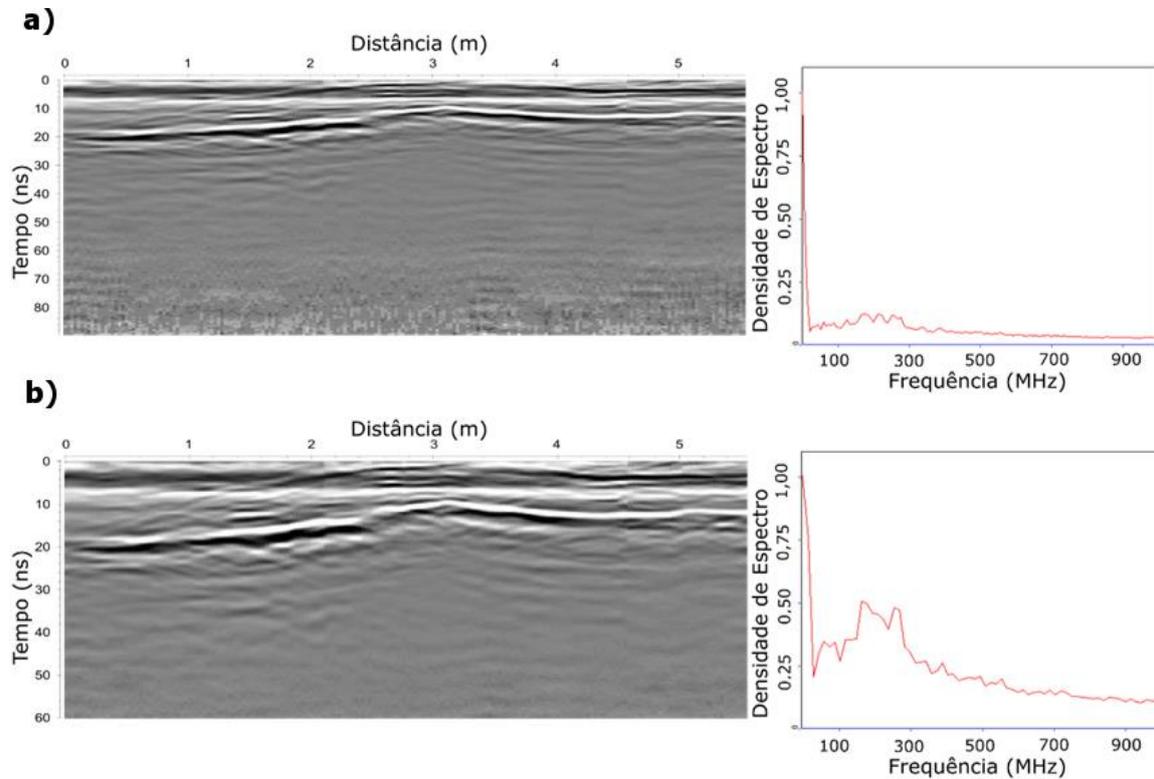
Como foi verificado na terceira etapa de processamento que o sinal possui muito ruído a partir do tempo de 60 ns , portanto, foi adotado este tempo como parâmetro de corte para a seção. Na Figura 19 são apresentadas as seções com TWT total e TWT cortado.

Na Figura 19b notou-se que o espectro de frequência da seção cortada ganha densidade e que os refletores se tornam distinguíveis entre si, agregando ao radargrama potencial para interpretação.

6.3.6 Passa-banda

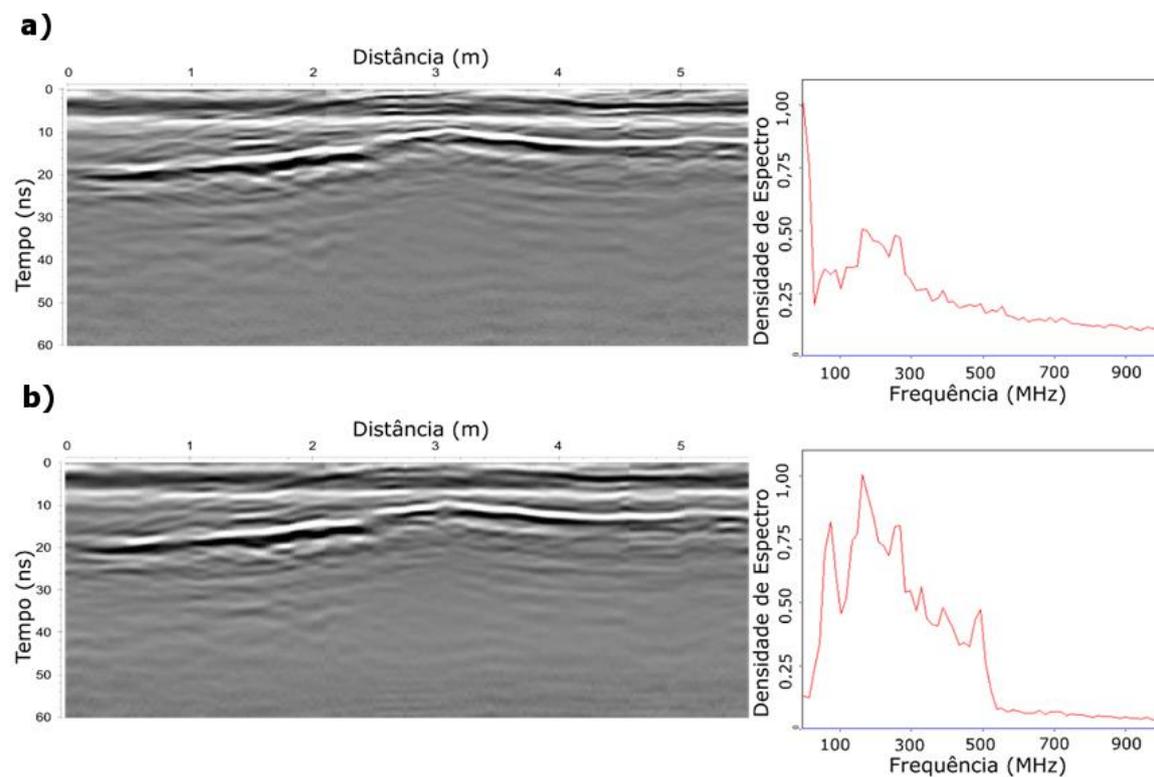
Na quinta etapa foram definidos os intervalos de 40 a 50 MHz e de 500 a 550 MHz para corte de frequência, sendo 40 e 550 MHz a banda passante e 50 e 500 MHz os valores de platô.

Figura 19 - Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois do corte no tempo



Fonte: próprio autor (2017)

Figura 20 - Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois da filtragem de banda



Fonte: próprio autor (2017)

Esses valores foram definidos através do comportamento espectral do dado, que de acordo com o que é visto na Figura 20a apresenta quedas na densidade nas regiões fora dessa banda. Na Figura 20 são apresentadas as seções antes e depois da filtragem de banda.

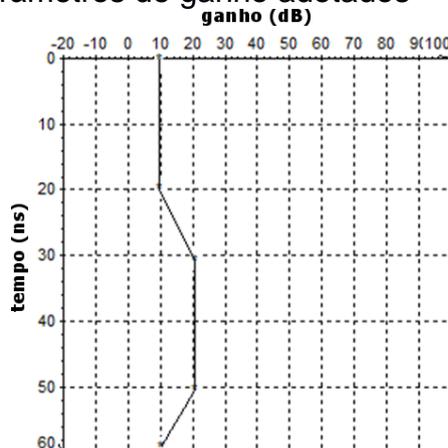
Notou-se, a partir da Figura 20b, que a filtragem de banda melhorou a relação de continuidade dos refletores sem comprometer a geometria de refletores bem definidos. Também se verifica o aumento na densidade do espectro dentro da banda definida no filtro, mantendo valores altos (próximos à 1) em região dentro da banda central da antena utilizada (100-300 MHz), o que é uma boa indicação quanto a qualidade do sinal.

6.3.7 1º Ganho Manual

Na Figura 21 é apresentada a janela de entrada com os valores adotados para sexta etapa de processamento.

No intervalo de 0 a 20 ns a seção apresenta refletores definidos com altos valores de amplitude, portanto, para este intervalo foi definido o valor de 1 dB de ganho. No intervalo de 30 a 50 ns a seção apresenta refletores com variações em geometria e amplitude, o que por sua vez os torna potenciais alvos de investigação, para este intervalo foi definido o valor de 10 dB de ganho. Para os demais intervalos de tempo do traço foram utilizados valores intermediários entre 1 e 10 dB. Na Figura 22 são apresentadas as seções antes e depois do ganho.

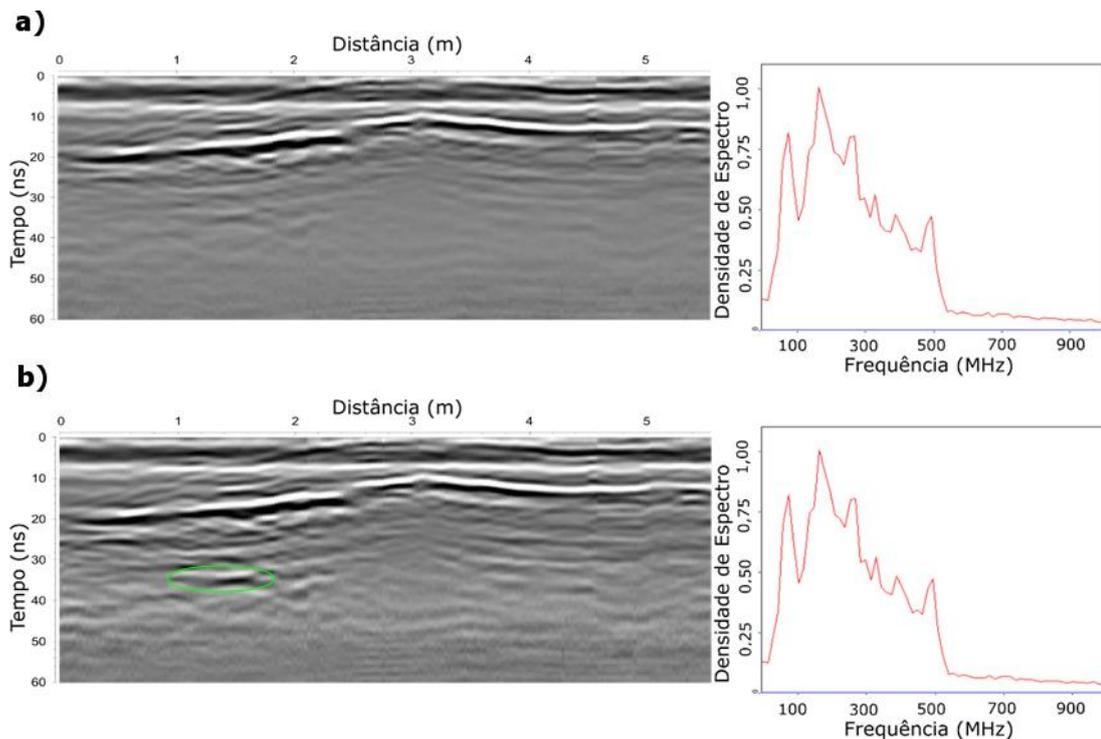
Figura 21 - Janela com parâmetros de ganho adotados



Fonte: próprio autor (2017).

A partir do ganho, na Figura 22b, é possível identificar (na região circulada) um refletor na posição $1,40\text{ m}$ e tempo 33 ns com geometria plana e amplitude significativamente maior em relação ao sinal abaixo e ao lado.

Figura 22 - Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois do primeiro ganho manual



Fonte: próprio autor (2017).

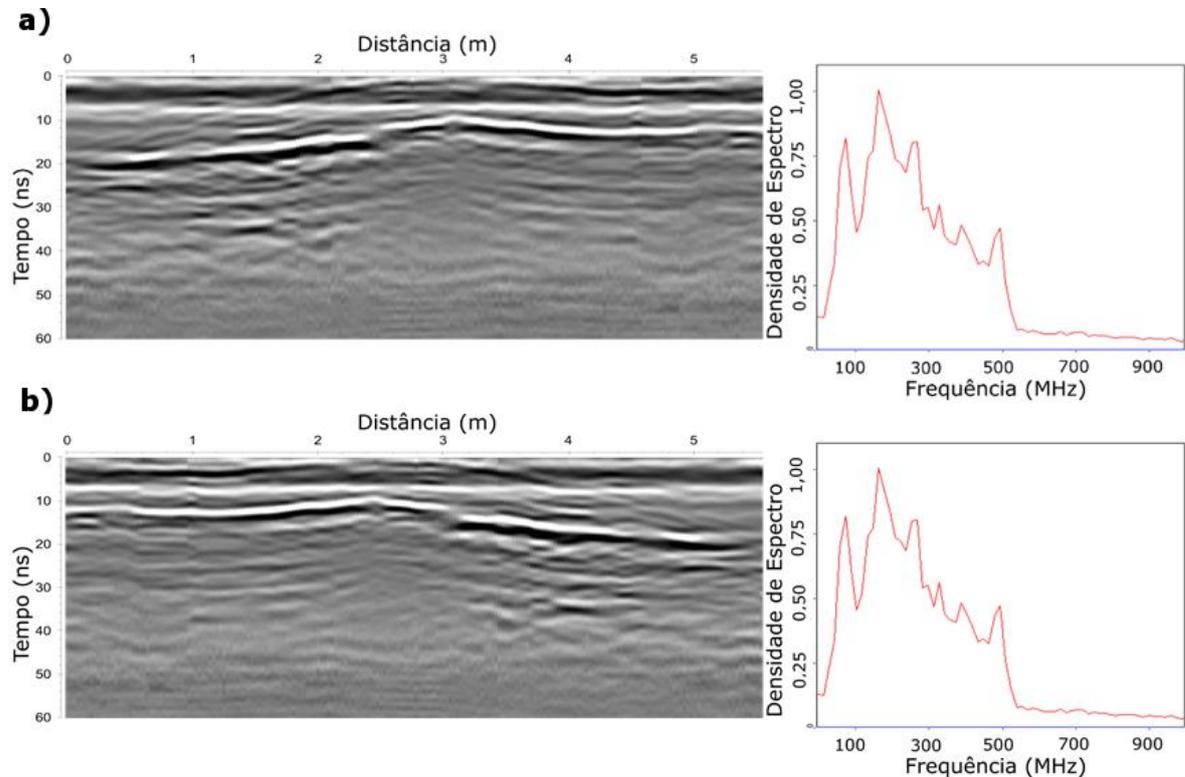
6.3.8 Reversão

Após o agrupamento das seções foi verificada a direção em que as aquisições foram realizadas ao longo do Perfil PST, em seguida as seções foram revertidas para visualização apenas em uma direção (I para F). Na Figura 23 a seção aa' é revertida para direção IF do Perfil PST.

6.3.9 Filtragem FK

Na Figura 24a é apresentado o espectro FK da seção aa', onde é verificado a presença de feixes até frequências de 1900 MHz , o que é uma inconsistência em relação a natureza da antena utilizada no estudo. Também são verificados feixes hori-

Figura 23 - Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois da reversão



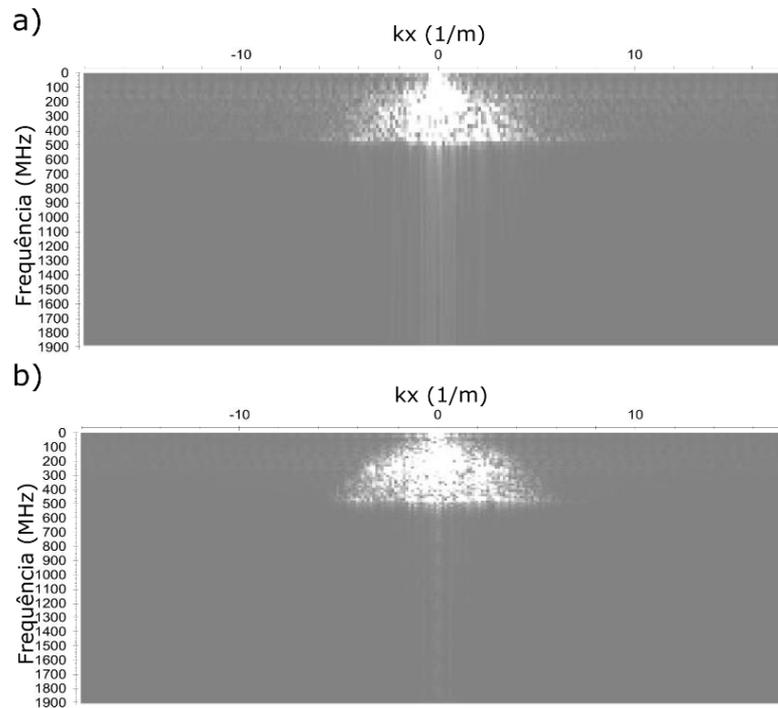
Fonte: próprio autor (2017).

zontais estreitos associados as frequências de 0 a 500 MHz que se estendem até os números de onda 20 e -20. Pelo comprimento de onda máximo e mínimo da antena utilizada, é esperado que números de onda acima de 10 (e -10), acima 1,5 m, ultrapassem o alcance desejado para o equipamento nas condições de campo.

Após a aplicação do filtro FK, na Figura 24b, é possível verificar que o espectro se concentra dentro dos valores da banda central de frequência e números de onda inferiores a 6. Na Figura 25 são apresentadas as seções antes e após a filtragem.

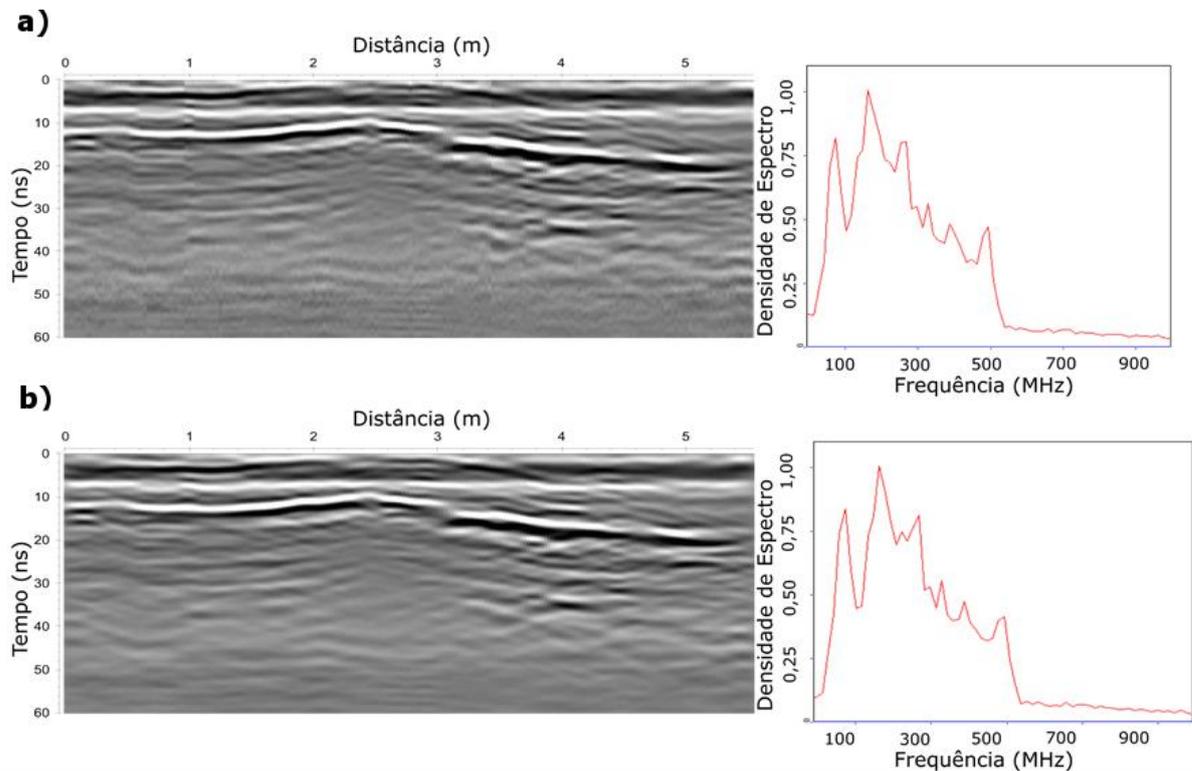
A partir da Figura 25 notou-se que a filtragem FK suavizou a seção, devido à redução de energia do espectro. Também foi verificado que não houve comprometimento da geometria de nenhum refletor presente na seção sem filtragem.

Figura 24 – Espectros FK dos dados da seção aa' a) antes e b) depois da filtragem FK



Fonte: próprio autor (2017).

Figura 25 - Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois da reversão

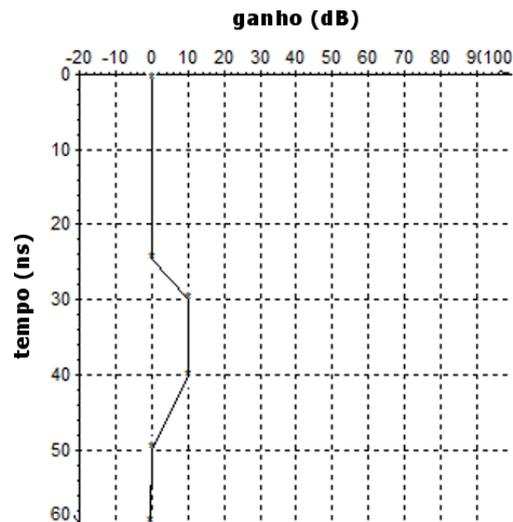


Fonte: próprio autor (2017)

6.3.10 2º Ganho manual

A nona etapa de processamento aplicado consiste em outro ganho manual, dessa vez para verificar a continuidade da reflexão destacada no item 6.3.7. Na Figura 26 são apresentados os parâmetros de entrada para o ganho.

Figura 26 - Janela com parâmetros de ganho adotados

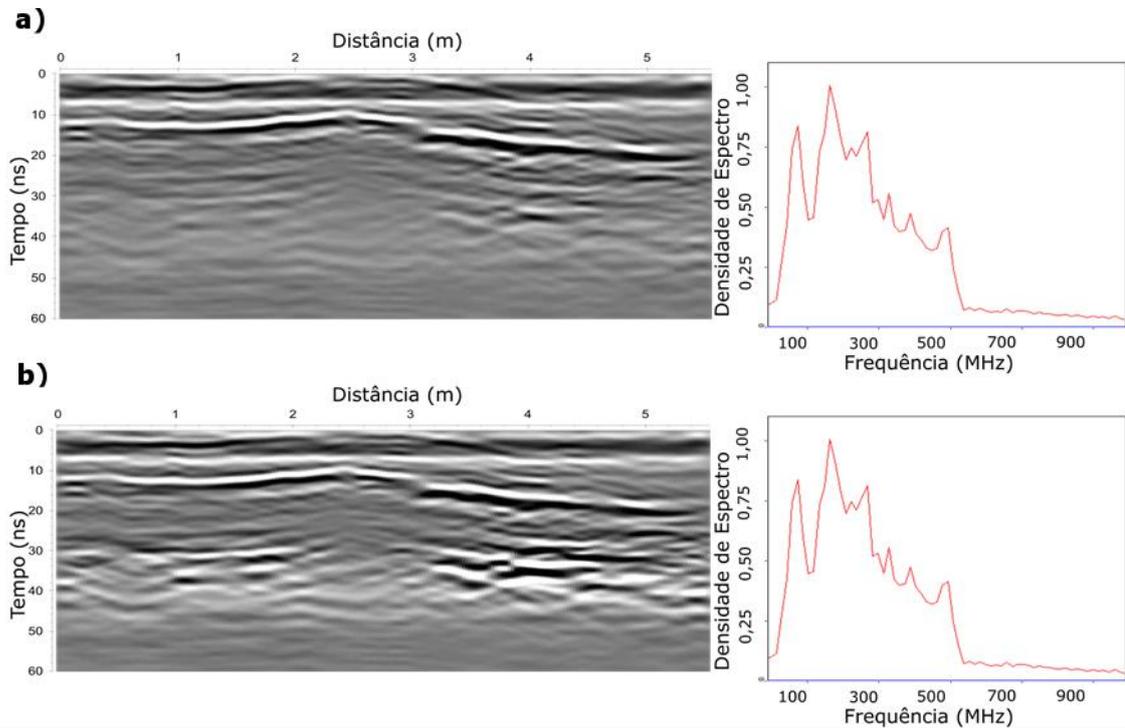


Fonte: próprio autor (2017).

Neste caso, que o ganho é utilizado para ressaltar a continuidade de um refletor específico, os parâmetros de intervalo de entrada foram definidos de acordo com a posição do refletor no *TWT* da seção. Portanto, de 30 a 40 *ns*, foi adotado o valor de 10 *dB* de ganho. De 0 a 25 *ns* e 50 a 60 *ns* foi utilizado o valor de 1 *dB*. Entre os intervalos de 25 a 30 *ns* e de 40 a 50 *ns* foram utilizados valores intermediários de 1 a 10*dB*. Na Figura 27 são apresentadas as seções antes e após o ganho.

Após o ganho, na Figura 27b, foi possível identificar a continuidade do refletor anteriormente destacado e verificar que o mesmo acompanha a geometria do refletor com mais energia acima. Essa característica geométrica dos refletores indicada paralelismo entre eles, o que por sua vez descreve a característica do acamamento estratigráfico registrado no afloramento PST.

Figura 27 - Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois do segundo ganho manual



Fonte: próprio autor (2017).

6.3.11 Background Removal

Os parâmetros de entrada utilizados no *software* foram: número total de traços e janela de tempo da seção (60 ns). Na Figura 28 são apresentadas as seções antes e após o *background removal*.

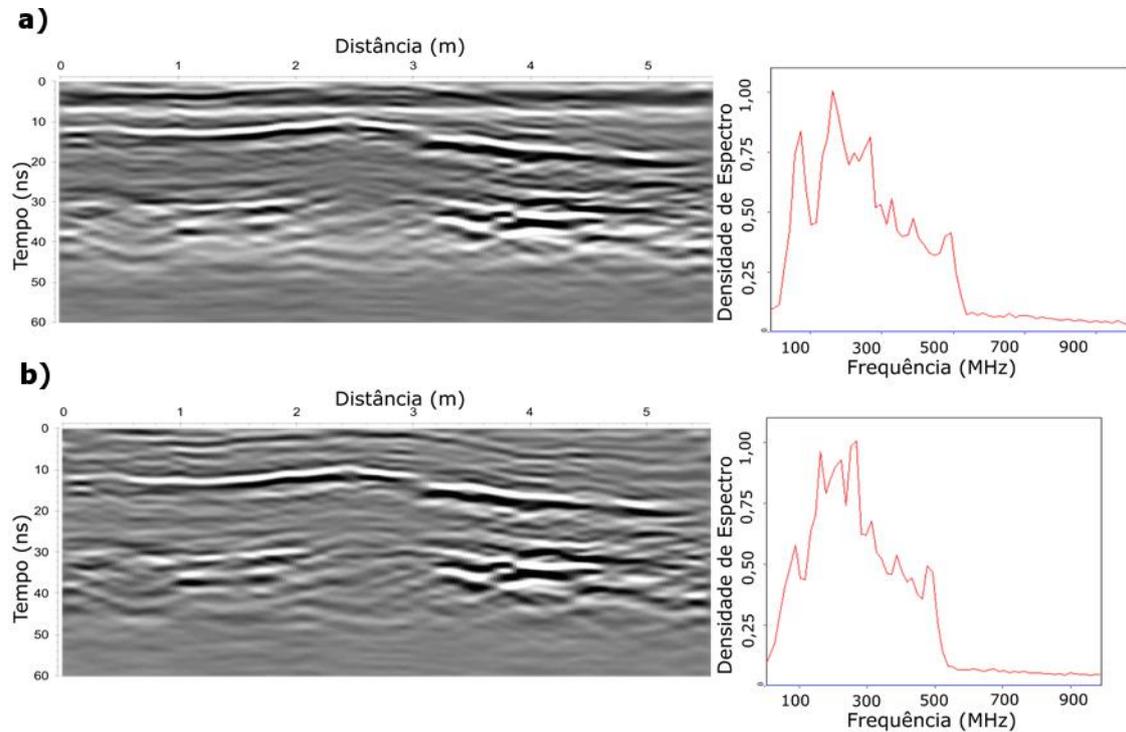
Através da Figura 28b foi possível notar a suavização das altas amplitudes decorrentes do ganho manual da etapa anterior. Também foi possível notar a retirada de faixas horizontais presentes no *TWT* superior a 40 ns.

6.3.12 Correção Topográfica

A partir do conjunto de dados topográfico foi feita a entrada para correção topográfica nas seções (Figura 29).

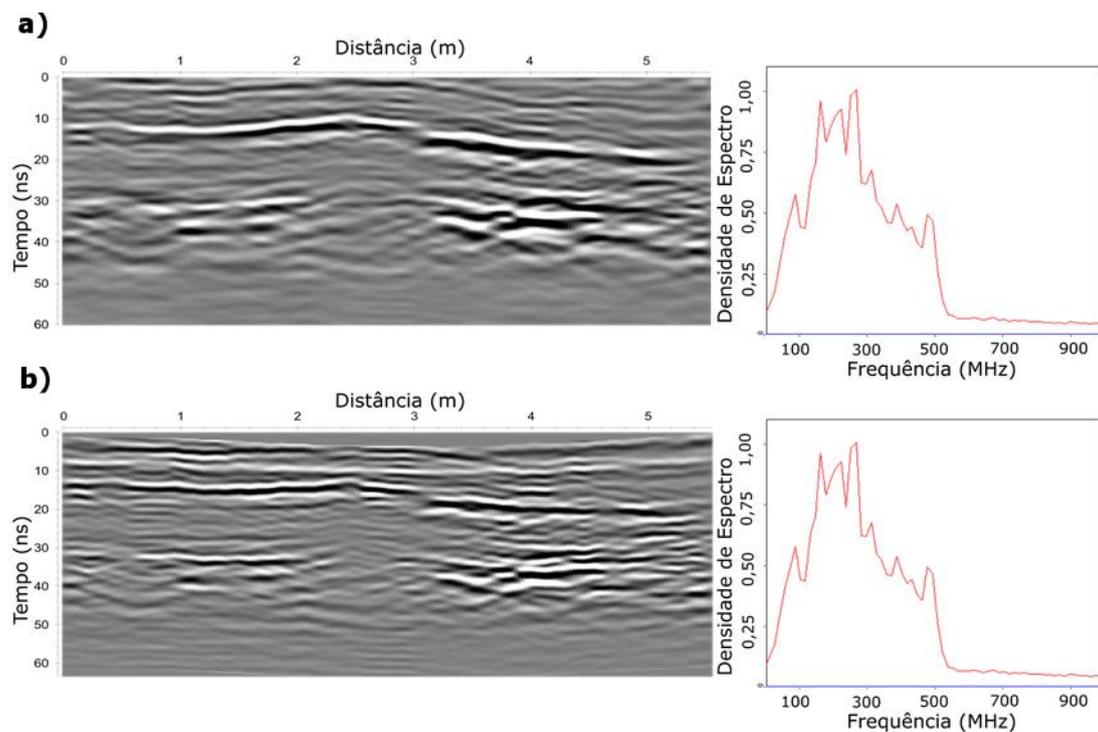
Ao observar a Figura 29b, notou-se que os refletores foram horizontalizados em relação à seção sem correção. Essa horizontalização de refletores reforça a característica do acamamento registrado no afloramento PST.

Figura 28 - Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois da aplicação do *background removal*



Fonte: próprio autor (2017).

Figura 29 - Radargramas e espectros de potência da seção aa' a) antes e b) depois da correção topográfica

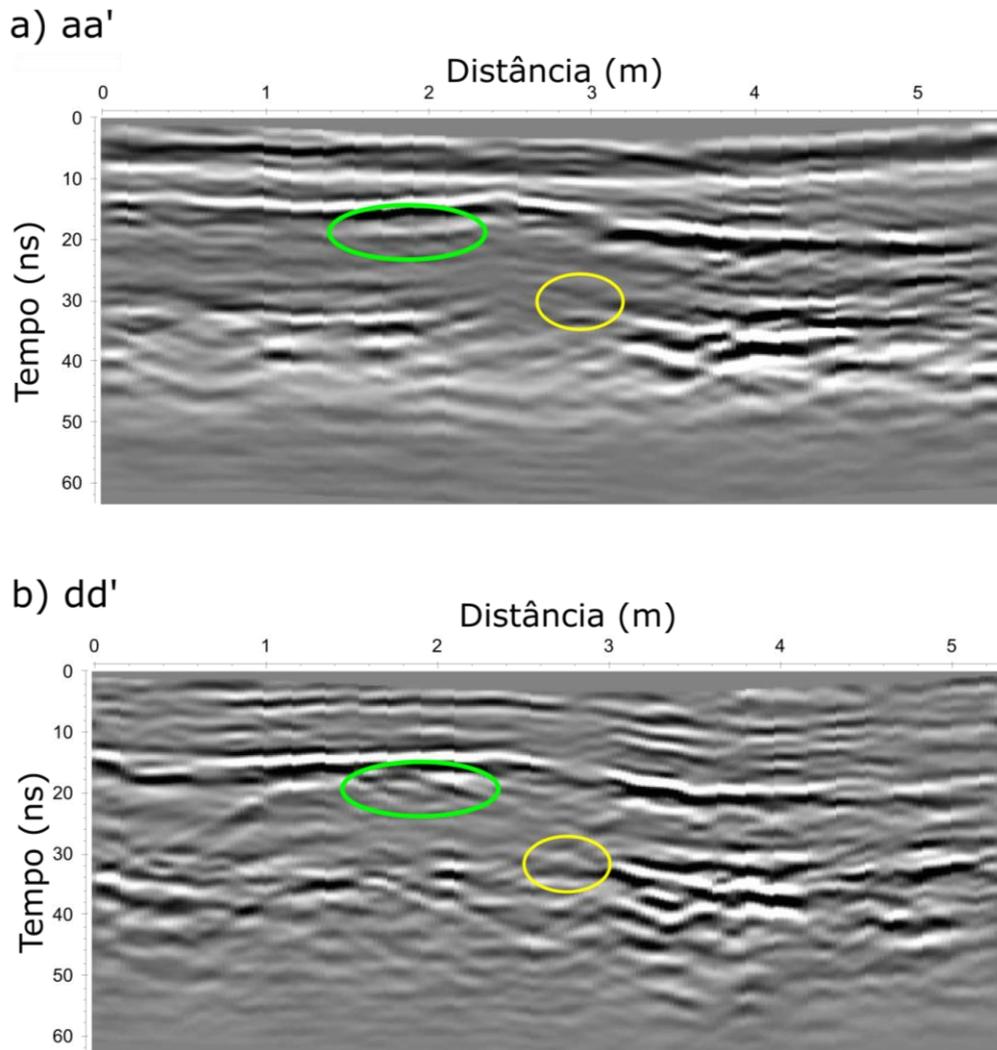


Fonte: próprio autor (2017).

6.3.13 Identificação dos alvos/Estimativa de velocidade

Após as etapas de processamento básico foi feita a identificação da posição dos alvos nos radargramas (Figura 30) através da comparação entre as seções aa' e dd' (seção com melhores resultados de aquisição com alvos).

Figura 30 – Identificação da posição dos alvos, destacados nas circunferências verdes e amarelas, a partir da comparação entre os refletores da a) seção aa' (sem alvo) e b) dd' (com alvo) após o processamento básico



Fonte: próprio autor (2017).

A posição obtida, em função da distância horizontal (m) e do TWT (ns), foi posteriormente relacionada com as medidas de controle dos alvos feita em campo, em profundidade (m) e distância horizontal (m), abrindo margem para a aplicação de

etapas avançadas de processamento em conjunto com interpretação dos radargramas

O Alvo 1, identificado pela elipse verde, produz uma feição hiperbólica no radargrama em conjunto com a diminuição de alcance do sinal emitido, essa verificada pela dificuldade no rastreamento do segundo refletor na região abaixo do alvo na seção dd'.

A diminuição no alcance do sinal pode estar relacionada com a geometria do alvo, que no caso, por possuir uma forma pontual (em relação a aquisição) age como fonte de difração, de modo que sinal emitido sobre ele colapse com as frentes de ondas defasadas emitidas pela difração. Outro fator que explica a perda de alcance do sinal emitido é devido à natureza condutiva do alvo, de modo que, ao sofrer ação de um pulso eletromagnético são geradas correntes elétricas no corpo que resultam em perda de energia térmica como produto final.

O Alvo 2, identificado pela circunferência amarela, produz uma feição hiperbólica no radargrama semelhante a obtida no primeiro alvo, mas com abertura reduzida. A hipérbole com abertura menor indica velocidade de propagação menor, o que é compatível com a resposta esperada para a Facie B.

Através da identificação da posição (x, t) dos alvos foi possível associar os refletores com as superfícies de contatos das Fácies A, B e C e estimar os valores de velocidade dos pacotes 1 e 2 (v_1 e v_2), referentes a Facie C e Facie C e B respectivamente.

A partir das velocidades v_1 e v_2 e da Equação de Dix foi feita o cálculo das velocidades intervalares ($v_{int\ 1}$ e $v_{int\ 2}$) das Fácies A e B (respectivamente). Nas Equações 32, 33, 34 e 35 são demons trados os cálculos realizados para obtenção dos valores de v_1 , v_2 , $v_{int\ 1}$ e $v_{int\ 2}$.

$$TWT_1 = 11\ ns \ \therefore\ t_1 = 5,5\ ns\ e\ \Delta x_1 = 0,75\ m \ \therefore\ v_1 = \frac{0,75}{5,5} = 0,13636\ m/ns \quad (32)$$

$$TWT_2 = 33\ ns \ \therefore\ t_2 = 16,5\ ns\ e\ \Delta x_2 = 1,10\ m \ \therefore\ v_2 = \frac{1,10}{16,5} = 0,06667\ m/ns \quad (33)$$

$$v_{int\ 1} = v_1 = 0,13636\ m/ns \quad (34)$$

$$v_{int\ 2} = \sqrt{\left(\frac{[(0,13636)^2 \cdot 5,5] - [(0,06667)^2 \cdot 16,5]}{16,5 - 5,5}\right)} = 0,05127\ m/ns \quad (35)$$

Onde TWT_1 é o tempo duplo de viagem da posição do Alvo 1, TWT_2 é o tempo duplo de viagem da posição do Alvo 2, t_1 é o tempo da chegada da onda no Alvo 1, t_2 é o tempo de chegada da onda no Alvo 2, Δx_1 é a profundidade em que o Alvo 1 está posicionado, Δx_2 é a profundidade em que o Alvo 2 está posicionado, v_1 é a velocidade do pacote 1 (referente a Facie C), v_2 é a velocidade do pacote 2 (Facie C e Facie B), $v_{int\ 1}$ é a velocidade do primeiro intervalo (Facie C), $v_{int\ 2}$ é a velocidade do segundo intervalo (Facie B).

Através da Equação 10 e das velocidades intervalares foram calculadas as permissividades elétricas ε de cada intervalo, adotando a permeabilidade magnética μ como 1. Os resultados são descritos nas Equações 36 e 37.

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{1}{v_{int\ 1}}\right)^2 1 = 53,78065\ pF \quad (36)$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{1}{v_{int\ 2}}\right)^2 1 = 380,42878\ pF \quad (37)$$

A partir das permissividades elétricas ε_1 e ε_2 foi feita a conversão para permissividade elétrica relativa ε_r de cada intervalo (Equações 38 e 39). Onde são encontrados valores próximos aos vistos nos trabalhos de Save (2004), Strange (2005) e Zhen (2013) para sedimentos e rochas arenosas (ε_{r1}) e sedimentos finos argilosos (ε_{r2}).

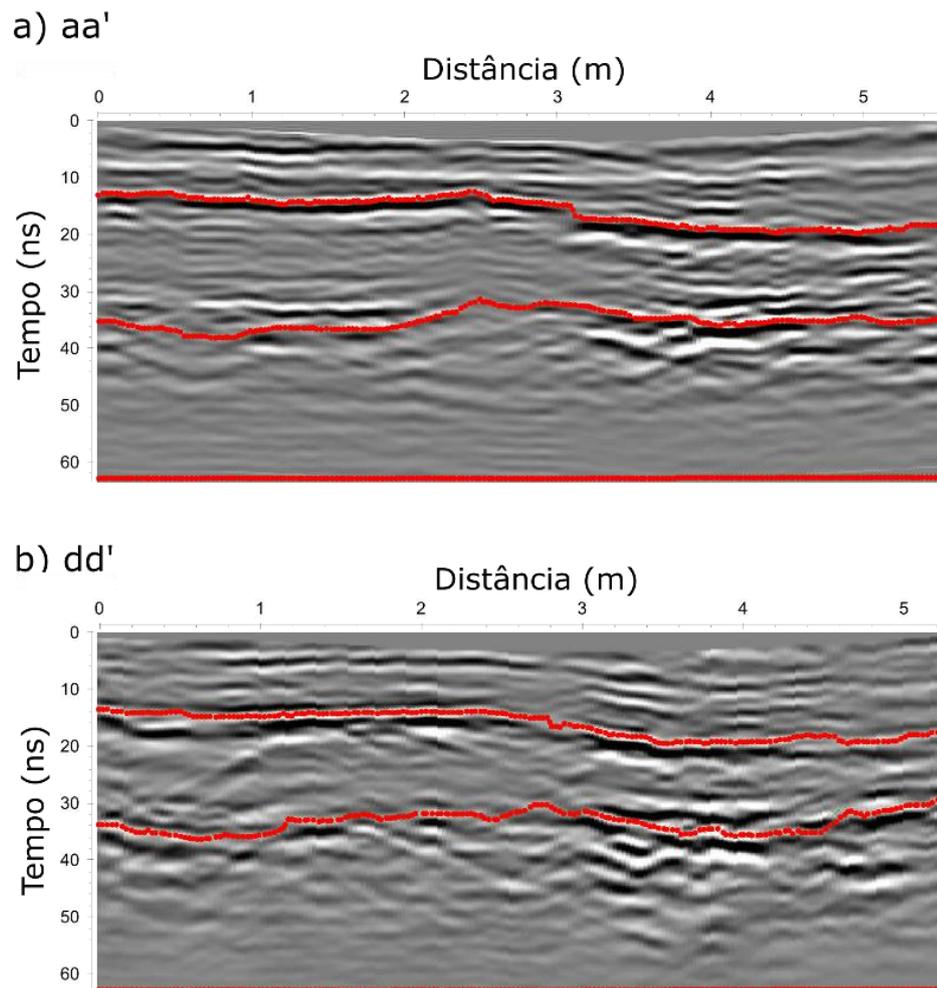
$$\varepsilon_{r1} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} = 6,04957 \quad (38)$$

$$\varepsilon_{r2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_0} = 42,79289 \quad (39)$$

6.3.14 Pickagem

Através da associação de refletores e superfícies de contato entre as Fácies foi realizado o processo de pickagem (Figura 31) das seções aa' e dd'. Neste procedimento foram adotados os valores de $v_{int\ 1}$ e $v_{int\ 2}$ para os dois primeiros intervalos, para o terceiro intervalo (respectivo a camada portadora de carvão) foi adotado o valor de 0,158 m/ns retirado do trabalho de Shuqui & Zhen (2013).

Figura 31 – *Pickagens* (em vermelho) nas seções a) aa' e b) dd' dos refletores definidos como interfaces de contato entre as Fácies C, B e A a partir dos alvos



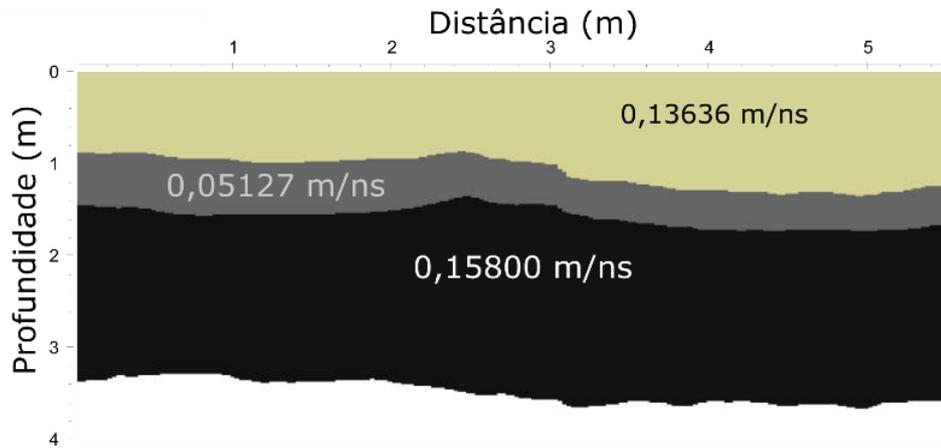
Fonte: próprio autor (2017).

Verificou-se a partir dos intervalos “pickados” que a geometria dos refletores nas seções aa' e dd' apresentaram tendências semelhante ao longo de intervalos maiores (baixa frequência), porém possuem divergências em curtos intervalos (alta frequência). Essas divergências podem estar associadas ao intervalo de tempo entre as aquisições de cada perfil, cerca de um mês, o que resultou em pequenas alterações morfológicas no terreno, implicando na variação da geométrica dos refletores durante a aquisição.

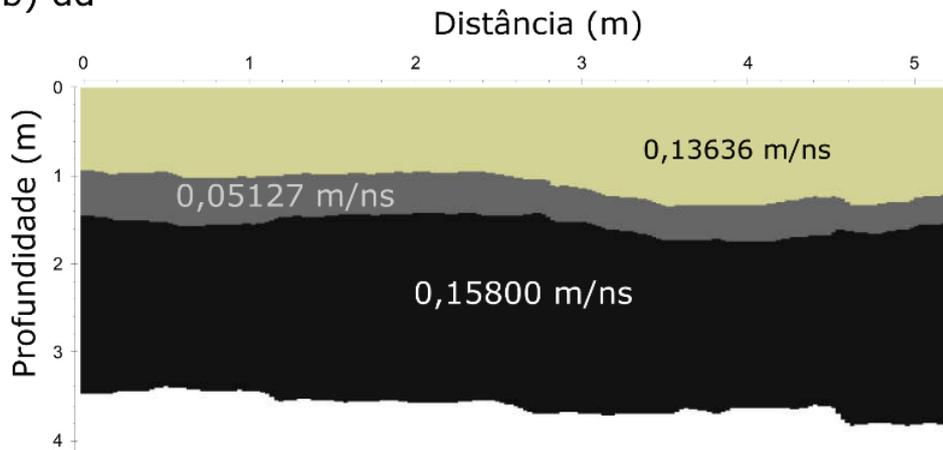
Por meio das *pickagens*, em conjuntos com os valores de $v_{int 1}$ e $v_{int 2}$, foram gerados modelos de velocidade adaptados as seções aa' e dd' (Figura 32), com horizontes de velocidade correspondentes a velocidade de propagação de onda nos três litotipos das Fácies A, B que acompanham a geometria dos refletores associados as superfícies de contato entre as fácies.

Figura 32 – Modelos de velocidade das seções a) aa' e b) dd'

a) aa'



b) dd'



Fonte: próprio autor (2017).

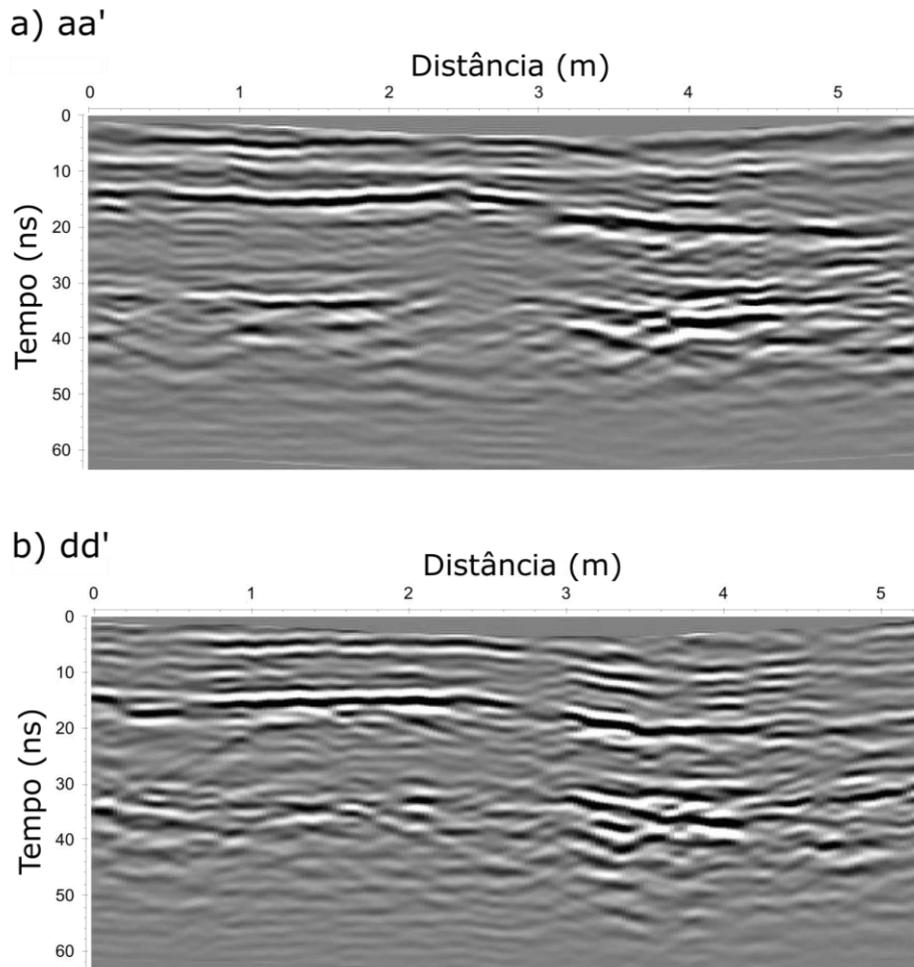
Foi verificado, através da observação dos modelos de velocidade, que a distribuição média de velocidades, até o topo do terceiro pacote (cor mais escura), é compatível em espessura com a variação litológica do afloramento. Ainda foi possível notar que entre os modelos existem divergências de poucos centímetros nas espessuras dos horizontes de velocidades associadas as divergências obtidas nas *pickagens*, essas decorrentes da aquisição no terreno irregular.

6.3.15 Migração

A partir dos modelos de velocidade 2D dos perfis aa' e dd' foi feita a entrada com os parâmetros neles obtidos para a migração das seções. As seções migradas são apresentadas na Figura 33.

Na Figura 33, foi observado que a migração aplicada nas seções resultou na suavização dos traços e no deslocamento de 1 *ns* na posição dos refletores. As variações não tiveram grande expressão devido a característica do acamamento plano dos alvos, de modo que, não há feições atuando como fonte de difração.

Figura 33 – Seções a) aa' e b) dd' migradas a partir do modelo de velocidade



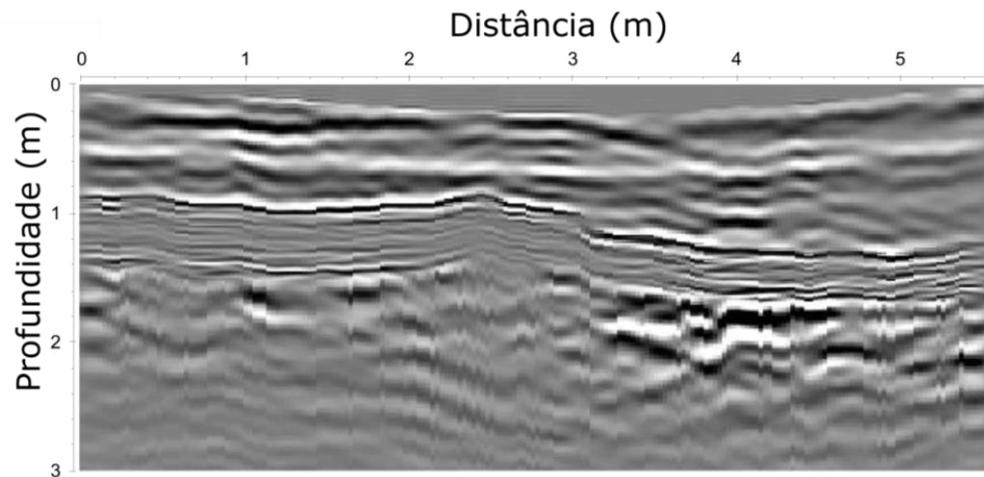
Fonte: próprio autor (2017).

6.3.16 Conversão tempo-profundidade

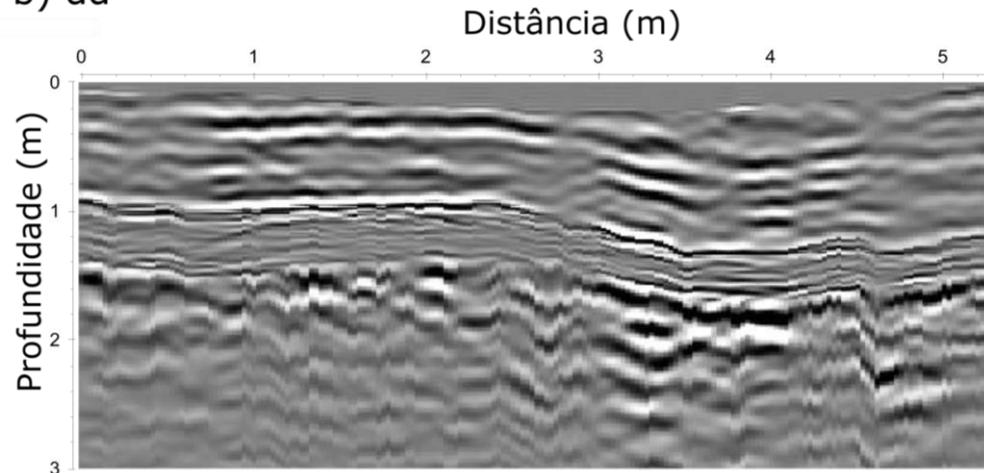
Após a migração, com os refletores nas posições reais em tempo e distância horizontal, foi realizada a conversão das seções, ou seja, as seções aa' e dd' foram convertidas de *TWT* (*ns*) para profundidade (*m*), Figura 34.

Figura 34 – Seções a) aa' e b) dd' convertidas de *TWT* para profundidade

a) aa'



b) dd'



Fonte: próprio autor (2017).

Através da conversão houve possibilidade de verificar, via comparação com dados diretos (afloramento), se os parâmetros utilizados para gerar as seções convertidas resultaram em produtos capazes de representar a geometria das Fácies B, C e da superfície de contato entre B e A (topo da camada portadora de carvão). Em ambas seções convertidas foram evidenciados três horizontes com limites bem definidos e geometrias semelhantes.

6.4 Interpretação

O primeiro horizonte com refletores com amplos (0,1 m), contínuos e com poucas quebras, apresenta uma espessura inicial de 0,80 m e ganha cerca de 0,30 m e ao se

estender pelo perfil, chegando próximo de 1,10 *m* no último metro de cada seção, porém apresenta um afinamento de 0,10 *m* próximo ao centro do perfil.

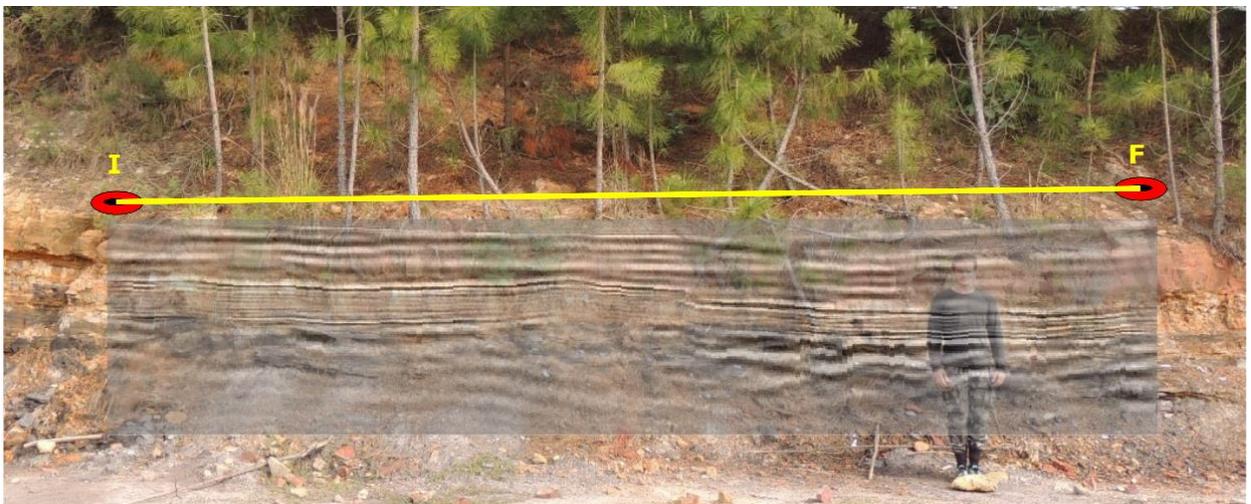
O segundo horizonte apresenta refletores com pequenos comprimentos de onda e baixas amplitudes, sendo esses divididos em parte contínuos e parte descontínuos. Possui espessura com variações menos expressivas que o primeiro, inicialmente com uma espessura de aproximadamente 0,40 *m* e ao final aproximadamente 0,30 *m*.

O terceiro horizonte apresenta refletores com maiores comprimentos de onda e amplitudes expressivas (favorecidas pelo ganho) próximos a região de contato com o segundo horizonte. De maneira geral os refletores desse horizonte apresentam padrões caóticos e pouca continuidade ao longo do perfil. A espessura deste horizonte não é considerada devido a velocidade utilizada não ser uma velocidade calculada, mas retirada de literatura.

Após a visualização das seções convertidas foi realizada a plotagem da seção aa' na imagem do afloramento PST, Figura 35, de modo que o radargrama deveria se adequar a escala da imagem utilizada, sobrepondo os horizontes 1, 2 e 3 sobre as Fácies C, B e A respectivamente.

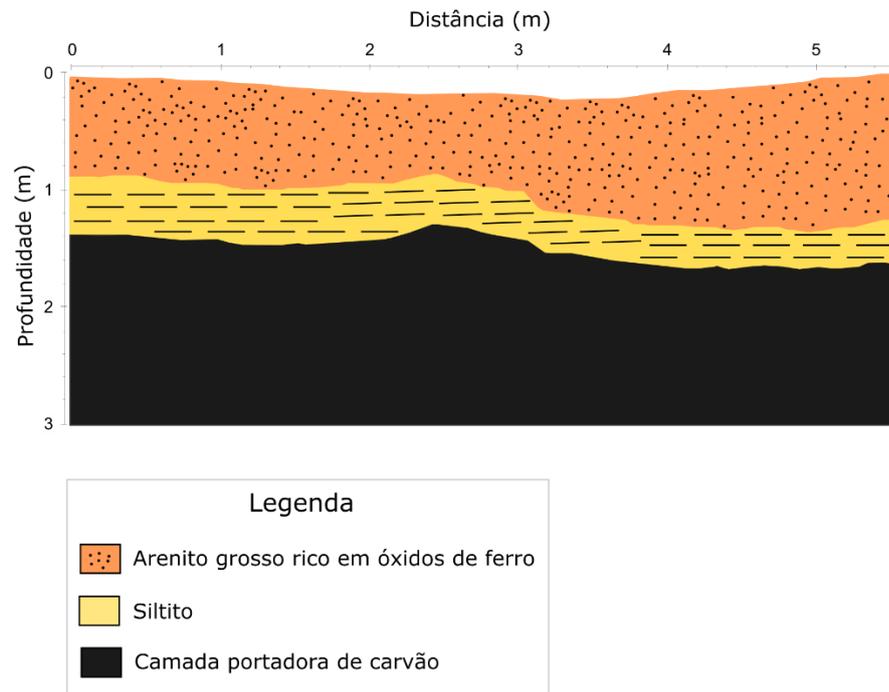
A partir da verificação de representatividade do radargrama no afloramento, foi gerado um modelo geológico a partir da seção aa' (Figura 36), e o modelo de sobreposição entre o afloramento e modelo geológico (Figura 37) para comparação e análise de divergências em relação profundidade e geometria dos horizontes interpretados.

Figura 35 – Seção aa' plotada sobre a imagem do afloramento PST



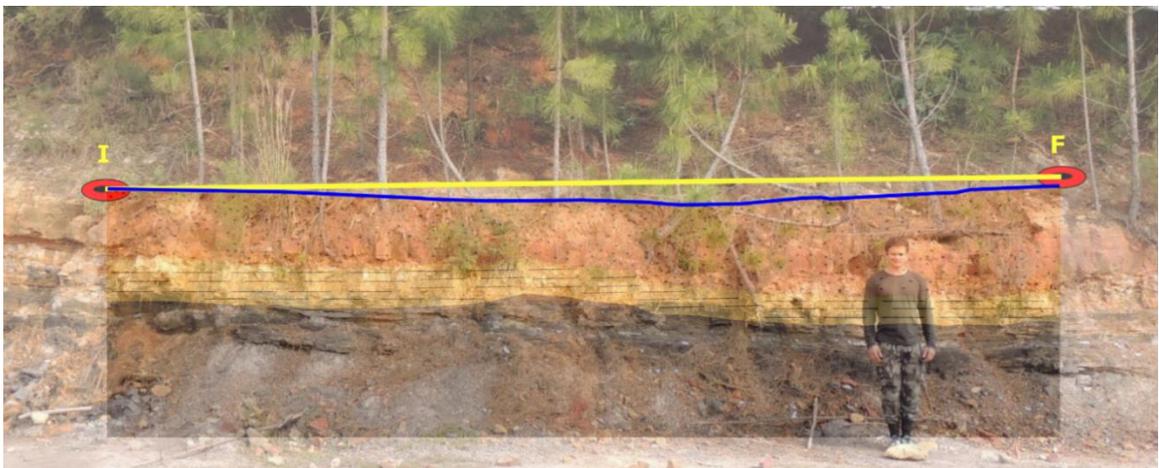
Fonte: próprio autor (2017).

Figura 36 – Modelo geológico gerado a partir da seção aa'



Fonte: próprio autor (2017).

Figura 37 – Modelo geológico sobreposto no afloramento (modelo de sobreposição)

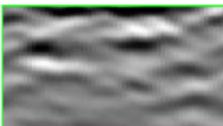


Fonte: próprio autor (2017).

6.5 Descrição de Radarfácies

Após a verificação de representatividade do radargrama no afloramento foram correlacionados (na Tabela 6) padrões de reflexão (radarfácies), da seção aa' migrada, com as fácies descritas no item 6.1.

Tabela 6 – Radarfácies associadas a fácies descritas no item 6.1

Radarfácies	Nome	Descrição	Fácies associada
	RC	Refletores contínuos com amplitude expressiva e relação subparalela	C
	RB	Refletores com continuidade moderada, amplitude baixa e relação subparalela	B
	RA	Refletores descontínuos com amplitude moderadas e relação caótica	A

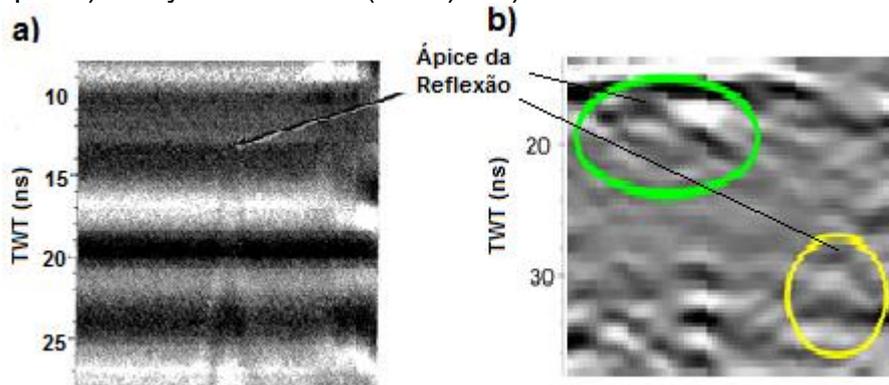
Fonte: próprio autor (2017).

6.6 Comparação com Estudos Anteriores

Neste item são apresentados resultados de estudos anteriores para validar, através de comparação, os resultados obtidos nesse trabalho.

No teste com barra feito por Conyers e Lucius (1996) a anomalia resultante tem formato hiperbólico, conforme representado na Figura 38a, com o ápice da hipérbole indicando a posição do alvo no tempo. Esse mesmo padrão hiperbólico, associado a presença da barra, é encontrado neste estudo (Figura 38b), e os valores de *TWT* utilizados para estimativa de velocidade são os valores onde se encontram os ápices das hipérboles.

Figura 38 – Anomalias com formato hiperbólico associadas aos alvos (barra) no teste feito por a) Conyers e Lucius (1996) e b) neste estudo



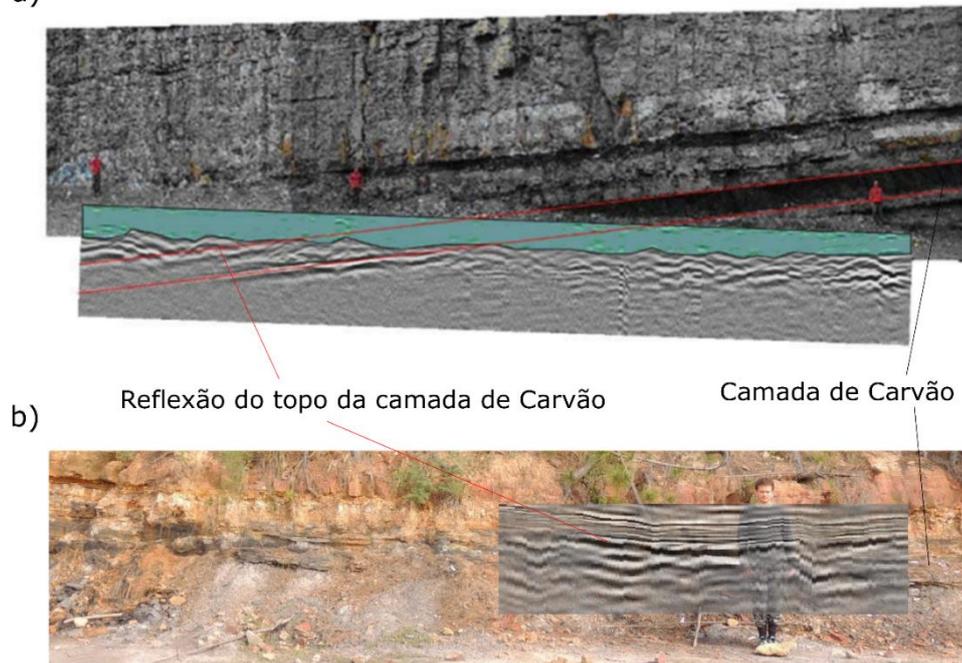
Fonte: retirado de Conyers e Lucius (1996) e próprio autor (2017).

O resultado obtido no teste de calibração de Weissling e Rubio (2009), adotando um equipamento de 200 MHz, foi capaz de mostrar o mergulho da camada de carvão aflorante, com reflexões acentuadas no topo e na base, através da combinação de foto e radargrama (Figura 39a). Na seção aa' sobreposta ao afloramento (Figura 39b), o radargrama foi capaz de representar a geometria do topo da camada de carvão (Fácies A), com um refletor acentuado associado a interface de discordância entre a Fácies A e B.

No mesmo estudo os autores estimaram a permissividade relativa do carvão e dos arenitos sobrepostos chegando ao resultado de 6,5. Este valor foi compatível com 6,04957, encontrado através do teste com barra, para o arenito da Fácies C.

No estudo de Kai (2012) é apresentada uma seção (Figura 40a) apontando o padrão de reflexão associado a uma camada de carvão lavrada na mina de Jingyang, na China.

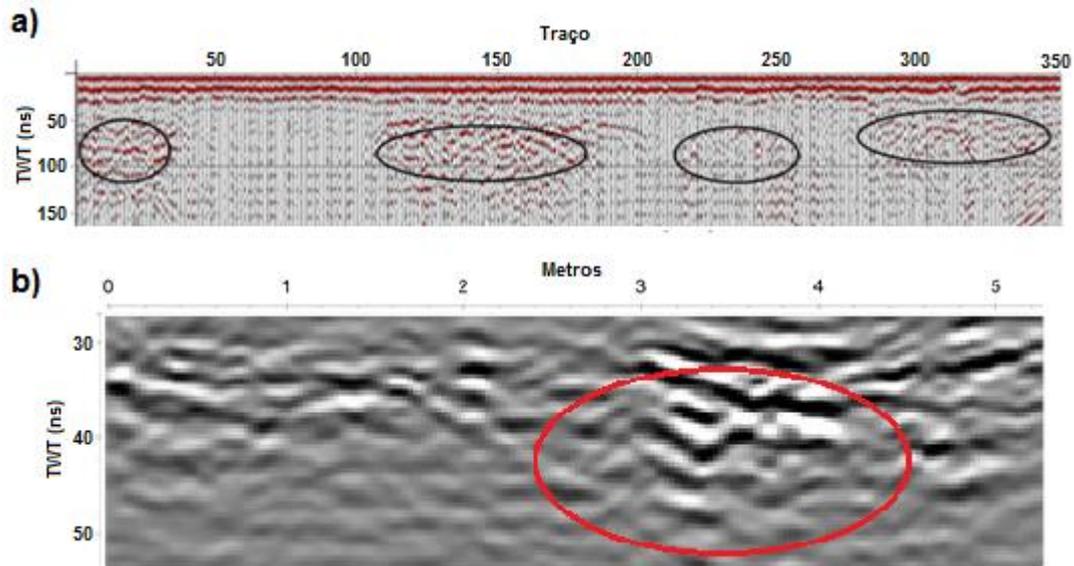
Figura 39 – Sobreposição de radargrama e afloramento a) no teste feito por Weissling e Rubio (2009) e b) neste estudo



Fonte: retirado de Weissling e Rubio (2009) e próprio autor (2017).

Através da Figura 40 percebe-se a semelhança no padrão caótico observado na radarfácies RA, registrado a partir da interface siltito-carvão (Figura 40b). A semelhança no padrão de reflexão é um bom indicativo para a qualidade de representatividade dos horizontes estratigráfico do afloramento PST nas seções de GPR tratadas.

Figura 40 – Padrão de reflexão associado estratos portadores de carvão apresentados por a) Kai (2012) e b) neste estudo



Fonte: adaptado de Kai (2012) e próprio autor (2017).

6.7 Compilação de Resultados

A partir da compilação de descrições faciológicas, padrões de reflexão de radarfácies, velocidades intervalares e permissividades elétricas relativa dos estratos com ocorrência de carvão foi obtido um conjunto de parâmetros representados na Tabela 7. Onde as camadas de arenito e siltito (Fácies C e B, respectivamente), com seus respectivos padrões de reflexão, são diretamente associadas as velocidades a permissividades relativas estimadas.

Tabela 7 – Conjunto de parâmetros compilados

Fácies	Radarfácies	v (m/ns)	ϵ_r
C	RC	0,13636	6,04957
B	RB	0,05127	42,79289
A	RA	-	-

Fonte: próprio autor (2017).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho a partir da aplicação *GPR* mostrou-se como potencial método geofísico de apoio a lavra de carvão na região de Candiota.

A antena utilizada de 200 *MHz* foi capaz de detectar a presença dos alvos no afloramento.

O teste com barra metálica adotado para estimativa de velocidade forneceu resultados consistentes, 0,13636 *m/ns* para o arenito e 0,05127 *m/ns* para o siltito, semelhantes a valores encontrados em outros trabalhos realizados em minas ativas de carvão.

A relação entre fácies e radarfácies demonstraram a capacidade do método para localização e representação geométrica de interfaces de topo de camada portadora de carvão.

Os parâmetros petrofísicos de velocidade de onda eletromagnética e permissividade elétrica relativa dos estratos com ocorrência de carvão, fornecerão valores de calibração precisos para futuras campanhas de *GPR* em localidades que possuam características litológicas semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCM, **Associação Brasileira de Carvão Mineral**. História do Carvão no Brasil. Disponível em <http://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=8&i_area=4>
- ANNAN, A. P. **Near-Surface Geophysics Part 1: Concepts and Fundamentals**. 1. ed., cap 11, p. 357-438, 2005.
- BURGER, R. H; SHEEHAN, F. A; JONES, H. C. **Introduction to Applied Geophysics: Exploring the Shallow Subsurface**. Norton & Company, Inc., New York. 2006.
- BUTLER, Dwain K. **Near-surface Geophysics**. United States of America: Society of Exploration Geophysicist, 2005.
- CONYERS, L. B., LUCIUS, J. E. *Velocity Analysis in Archaeological Ground-Penetrating Radar Studies*. **Archaeological Prospection**. 3, 25-38. (1996)
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Disponível em <<http://geobank.cprm.gov.br>>. 2017. Acesso em 05 de Abril de 2017.
- DANIELS, D. **Ground penetrating radar**, 2nd ed. Lodon: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- GOOGLE EARTH. *Software* disponível em <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. 2017. Acesso em 05 de Abril de 2017.
- HATHERLY, Peter. *Overview on the application of geophysics in coal mining*. **Internation Jornal of Coal Geology**. 114, 74-84. (2013)
- HOLZ, M. et al. *Hierarchy of tectonic controlo n stratigraphic signatures: Base-level changes during the Early Permian in the Paraná Basin, southernmost Brazil*. **Journal of South American Earth Scienses**. 22, 185-204. (2006)
- INKSCAPE, **Free Software**. *The Inkscape Group* versão 3. 2007.
- JAMES, Noel P. DALRYMPLE, Robert W. **Facies Models 4**. Volume 4. Canada: Geological Association of Canada. 2010.
- JOL, Harry M. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. 1ª Edição. Kidlington: Oxford, 2009.
- KAI et al. *Application of Ground Penetrating Radar (GPR) on the Controlling of the Coalfield Fire*. **International Journal of Advancements in Computing Technology**. 4, 239-246. (2012)

KALKREUTH, W. et al. *Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezina, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil*. **International Journal of Coal Geology**. 68, 79-116. (2006)

MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. **Boletim das Geociências – Petrobras**. 15 (2), 265-287. (2007)

MOLINDA, G. M. et al. **Using Ground Penetrating Radar for Roof Hazard Detection in Underground Mines**. Report of Investigations:9625. United States Department of Energy: Pittsburgh Research Center, 1996.

NEAL, Adrian. *Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress*. **Earth-Science Reviews**, Wolverhampton, 66, 261-330. (2004)

PRISM2, **Software**. *RadarSystems* versão 2.5. 2013

QGIS. **Free Software**. *Open Source Geospatial Foundation* versão 2.18.1. 2016.

RAMGRAB, Gilberto, WILDNER, Wilson. **Carta Geológica Folha Pedro Osório (SH. 22- Y-C), RS**. Projeto de Mapeamento Geológico/Metalogenético Sistemático (CPRM). (1999). Universidade de São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. (2011)

RAMGRAB, Gilberto, WILDNER, Wilson. **Geologia da Folha Pedro Osório (SH. 22- Y-C), RS**. Projeto de Mapeamento Geológico/Metalogenético Sistemático (CPRM). (1999). Universidade de São Paulo: Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. (2011)

REFLEXW, **Software**. *Sandmeier Geophysical Research*. 2014.

SAVE, N. **Ground Penetrating Radar Technique to Locate coal mining related features**. Texas: Texas A&M University, 2004.

SECCATORE, J. MARIN, T. TOMI D. G. Aplicabilidade do Método de Lavra “Longwall top coal caving” nas Jazidas de carvão na Região Sul. **Net**. São Paulo, Universidade de São Paulo. jan. 2011. Disponível em <<http://www.researchgate.net/publication/277669450>>

SHUQUI, W. ZHEN, W. *Ground Penetrating Radar Signal Processing Algorithm in Advance Detection of Coal Seam*. **Information Technology Journal**. 12 (19), 5258-5263. (2013)

STRANGE, Andrew et al. *Near-Surface Interface Detection for Coal Mining Applications Using Bispectral Features and GPR*. **Subsurface Sensing Technologies and Applications**, 6 (2), 125-149. (2005)

THOMAS, Larry. **Coal Geology**. 2ª Edição. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd. 2013.

WEISLING, B. RUBIO, G. Evaluating GPR for Geotechnical and Hazards Assessment of Deep-Mine Geology. **FastTimes**, 14 (1), 26-31 (2009)