



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE DA APLICABILIDADE DO GPR E ELETORRESISTIVIDADE NA DETECÇÃO DE DUTOS

ALAN AZEVEDO ALVES

SALVADOR – BAHIA

DEZEMBRO – 2011

Análise da aplicabilidade do GPR e eletrorresistividade na detecção de dutos

por

ALAN AZEVEDO ALVES

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

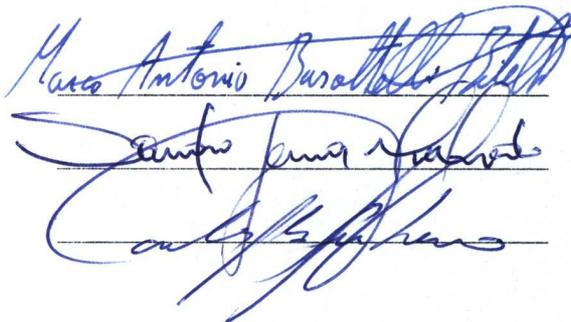
DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora



Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho - Orientador

Dr. Sandro Lemos Machado

Dr. José Carlos Alves Pinheiro

Data da aprovação: 20/12/2011

Dedico este trabalho aos meu pais,
Aurelison e Leontina, à minha
namorada, Emile, e a todos os meus
amigos e familiares que estiveram ao
meu lado sempre me apoiando e
torcendo pelo meu sucesso.

RESUMO

Este trabalho analisa a aplicabilidade do GPR (Radar de Penetração no Solo) e do método eletrorresistivo na detecção de tubulações metálicas enterradas em subsuperfície, as quais servem para o transporte de gás, óleo e derivados. Para isto foram registrados perfis de 30 m de comprimento, que é a largura da faixa de dutos, com o método GPR e eletrorresistividade, nas travessias dos rios Real, Sauípe e Quiricó Grande, localizados na faixa de dutos GASEB, no litoral norte do estado da Bahia. A primeira seção a ser levantada sempre foi a mais próxima possível do leito do rio, e as demais foram posicionadas à 10 m, 20 m, 30 m e 50 m da primeira, sendo que todas são paralelas entre si e transversais à faixa. Este arranjo foi escolhido para que os métodos em análise por este trabalho fossem testados em diferentes tipos de solos com diferente saturação de água no solo.

O GPR utiliza-se de ondas eletromagnéticas para detectar e medir a profundidade dos alvos (dutos). Neste estudo foram utilizados os equipamentos RAMAC nas frequências de 100 MHz, 200 MHz e 400 MHz e o equipamento VIY 2 nas frequências de 125 MHz e 300 MHz. O método eletrorresistivo injeta correntes elétricas artificiais no solo e mede a diferença de potencial entre dois pontos e com isso é possível medir a resistividade aparente da subsuperfície estudada. Neste caso o equipamento utilizado foi o Syscal Pro Switch 72.

A análise dos radargramas mostrou que na maioria das margens o GPR vai perdendo a capacidade de localização dos alvos à medida que as seções estão mais próximas do leito do rio. Isto se deve, em parte, devido à presença de argilo-minerais no solo associado ao aumento da saturação de água no solo.

Combinando as informações dos radargramas com os perfis elétricos foi possível determinar que o RAMAC não foi capaz de fornecer informações de subsuperfície nas áreas onde a resistividade aparente é inferior a 90 ohm.m. Comparando os dois modelos de GPR utilizados, o VIY 2 de 125 MHz foi o que apresentou melhor qualidade dos dados, pois foi capaz de detectar mais hipérboles ou detectar maiores detalhes destas (um ápice e duas pernas) nas mesmas seções.

Este trabalho avalia a eficiência dos georadares na localização de dutos enterrados, entretando acredita-se que sejam necessários estudos complementares com o método eletrorresistivo a fim de melhor responder sobre a correspondência entre presença de tubulação e anomalias de resistividade circulo/ovaladas encontradas.

ABSTRACT

This work analyzes the applicability of GPR (Ground Penetrating Radar) and of electrorresistivity method in the detection of buried metallic pipes in the subsurface, which serves to transport gas, oil and derivatives. There were acquired profiles with 30 m length, which is the width of the tubes band, with the GPR and electrorresistivity method, in the crossings of “Rio Real, Sauipe e Quiricó Grande”, located in the ducts band named GASEB, located on the northern coast of Bahia estate. The first section was always the closest possible to the riverbed, and the others were positioned at 10 m, 20 m, 30 m and 50 m to the first and all of them are parallel one each other and transverse to the band. This arrangement was chosen to test the methods under analyzes in this work in different soil types with different soil water saturation.

The GPR uses electromagnetic waves to detect and measure the depth of the targets (pipes). In this study we used the RAMAC devices at frequencies of 100 MHz, 200 MHz and 400 MHz and VIY 2 equipment in the frequencies of 125 MHz and 300 MHz. The electrorresistivity method injects electric currents into the ground and measures the potential difference between two points. With this, is possible to measure the apparent resistivity of the subsurface studied. In this work the equipment used was Syscal Pro Switch 72.

Radargrams analysis showed that in most of the banks estudied, the GPR lost the ability to find targets as the sections are closer to the riverbed. This is due, in part, because of the presence of clay minerals in the soil associated with the increasing of the water saturation of the soil.

Combining the information from radargramas with electric profilers it was determined that the RAMAC was not able to provide information on subsurface areas where the apparent resistivity is less than 90 ohm.m. Comparing the two models used, the GPR VIY 2 of 125 MHz showed the best data quality, once it was able to detect more hyperbolas or more detailed hyperbolas (two legs and one apex) at same section.

This work evaluates the efficiency of the georadar in localizing the ducts, but we believe that is necessary complementaries studies with electrorresistivity method in order to better respond about the correspondence between the presence of ducts and the the circle/oval anomalies of resistivity found.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABELAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Fundamentação Teórica	4
1.1 Propagação de ondas eletromagnéticas	5
1.2 Funcionamento do GPR	11
1.3 Método Eletrorresistivo	11
CAPÍTULO 2 Aquisição dos Dados	16
2.1 Equipamentos utilizados	16
2.1.1 Sistema RAMAC	16
2.1.2 Sistema VIY 2	17
2.1.3 Syscal Pro Switch 72	17
2.2 Local de Aquisição	18
2.3 Processamento dos dados	21
2.3.1 Processamento dos dados do RAMAC	21
2.3.2 Processamento dos dados do VIY 2	23
2.3.3 Processamento dos dados do Syscal Pro Switch 72	24
CAPÍTULO 3 Discussões e Resultados	25
3.1 Rio Real	25
3.1.1 Margem esquerda	25
3.1.2 Margem direita	30
3.2 Rio Sauípe	37
3.2.1 Margem esquerda	37
3.2.2 Margem direita	45
3.3 Rio Quiricó Grande	53

3.3.1	Margem esquerda	53
3.3.2	Margem direita	57
CAPÍTULO 4	Conclusões	64
	Agradecimentos	66
	Referências	67

ÍNDICE DE TABELAS

1.1	Permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) e condutividade elétrica (σ_0) observadas nos materiais. (Davis e Annan, 1989).	7
1.2	Valores da permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) e velocidades da onda eletromagnética (v) para alguns materiais geológicos e artificiais (Reynolds, 1997)	9
1.3	Estimativa da profundidade máxima de penetração em função da frequência central das antenas. Fonte: (http://www.alphageofisica.com.br/gssi/gpr.htm)	11
1.4	Intervalos de resistividades elétrica de alguns materiais geológicos (Telford et al., 1990) (adaptado).	15

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Principais processos que provocam a perda do sinal eletromagnético (Reynolds, 1997).	8
1.2	Alvos de radar e suas respectivas imagens. a) alvo pontual; b) camada com borda abrupta; c) embasamento ou interface entre duas camadas. O primeiro e o segundo caso produzem hipérbolas de difração (Mello, 2008).	12
1.3	Esquema da distribuição dos eletrodos no solo durante uma aquisição de eletrorresistividade. As linhas cheias indicam o fluxo de corrente, enquanto que as linhas tracejadas indicam as linhas de equipotenciais geradas pela corrente (Dias, 2008).	13
1.4	Modelo esquemático do arranjo de eletrodos Schlumberger (Ribeiro, 2008).	13
1.5	Modelo esquemático do arranjo de eletrodos Wernner (Ribeiro, 2008).	14
1.6	Modelo esquemático do arranjo de eletrodos dipolo-dipolo (Ribeiro, 2008).	15
2.1	Imagem ilustrativa do sistema RAMAC	17
2.2	Imagem ilustrativa do sistema VIY 2	18
2.3	Imagem ilustrativa do Syscal Pro Switch 72	18
2.4	Mapa de parte do litoral norte baiano contendo os locais das travessias. (www.googlemaps.com.br)	19
2.5	Croqui das seções de GPR e eletrorresistividade	20
2.6	Figura ilustrativa do modelo de blocos utilizado	24
3.1	Radargramas do Rio Real, margem esquerda, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	27
3.2	Radargramas do Rio Real, margem esquerda, antena VIY 2 de 125 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	28
3.3	Radargramas do Rio Real, margem esquerda, antena VIY 2 de 300 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	29
3.4	Radargramas do Rio Real, margem direita, antena RAMAC de 100 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	31
3.5	Radargramas do Rio Real, margem direita, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	32
3.6	Radargramas do Rio Real, margem direita, antena RAMAC de 400 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	33
3.7	Radargramas do Rio Real, margem direita, antena VIY 2 de 125 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	34

3.8	Radargramas do Rio Real, margem direita, antena VIY 2 de 300 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	35
3.9	Radargramas do Rio Real, margem direita, Seção 5, RAMAC, 100 MHz acima, 200 MHz no meio e 400 MHz abaixo.	36
3.10	Radargramas do Rio Sauípe, margem esquerda, antena RAMAC de 100 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	39
3.11	Radargramas do Rio Sauípe, margem esquerda, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	40
3.12	Radargramas do Rio Sauípe, margem esquerda, antena VIY 2 de 125 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	41
3.13	Radargramas do Rio Sauípe, margem esquerda, antena VIY 2 de 300 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	42
3.14	Perfis de resistividade aparente medida no Rio Sauípe, margem esquerda. Seção 1 acima e 5 abaixo.	43
3.15	Perfis de resistividade aparente do modelo invertido do Rio Sauípe, margem esquerda. Seção 1 acima e 5 abaixo.	44
3.16	Radargramas do Rio Sauípe, margem direita, antena RAMAC de 100 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	47
3.17	Radargramas do Rio Sauípe, margem direita, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	48
3.18	Radargramas do Rio Sauípe, margem direita, antena VIY 2 de 125 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	49
3.19	Radargramas do Rio Sauípe, margem direita, antena VIY 2 de 300 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	50
3.20	Perfis de resistividade aparente medida no Rio Sauípe, margem direita. Seção 1 acima e 5 abaixo.	51
3.21	Perfis de resistividade aparente do modelo invertido do Rio Sauípe, margem direita. Seção 1 acima e 5 abaixo.	52
3.22	Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem esquerda, antena RAMAC de 100 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	54
3.23	Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem esquerda, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	55
3.24	Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem esquerda, antena RAMAC de 400 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	56
3.25	Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem direita, antena RAMAC de 100 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	59
3.26	Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem direita, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	60

3.27 Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem direita, antena RAMAC de 400 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.	61
3.28 Perfis de resistividade aparente medida no Rio Quiricó Grande, margem direita. Seção 1 acima e 5 abaixo.	62
3.29 Perfis de resistividade aparente do modelo invertido do Rio Quiricó Grande, margem direita. Seção 1 acima e 5 abaixo.	63

INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente tem crescido nas últimas décadas, seja em nível do cidadão, do estado ou da indústria. Associado a este fenômeno, sabe-se que a competitividade industrial aumenta a cada dia e isso leva as indústrias a buscarem maneiras de reduzir seus custos de produção e aumentarem a segurança no trabalho afim de evitar acidentes. A indústria petroquímica por trabalhar com grandes volumes de substâncias líquidas e gasosas se utiliza do transporte destas substâncias por meio de tubovias como forma barata e segura de transporte das suas matérias-primas e produtos. Um rígido controle destas tubulações deve ser feito durante a sua vida-útil para evitar rompimentos que podem ocasionar perdas humanas e financeiras além de impactos ao meio ambiente.

A geofísica é uma ciência cujas ferramentas se mostram bastante eficientes em localizar e determinar as profundidades em que se encontram enterradas as tubulações. Nesta tarefa, pode-se destacar o GPR (*Ground Penetrating Radar* ou Radar de Penetração no Solo, em português) como ferramenta chave neste processo. Isto porque o GPR pode, a depender do solo, detectar um tubo enterrado até 10 m de profundidade, podendo até mesmo ser utilizado sobre a lâmina d'água de um rio. O georadar, como também é chamado o GPR, teve nas últimas duas décadas um rápido desenvolvimento na sua teoria, técnica, tecnologia e aplicações. O GPR utiliza ondas eletromagnéticas para incidir nos alvos objetos de estudo. Estas ondas eletromagnéticas foram descritas teoricamente pelo físico escocês James Clerk Maxell em 1865 e posteriormente comprovadas em 1888 pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz, com a construção de equipamentos que produziam e transmitiam tais ondas em frequências controladas pelos mesmos. Entretanto, o sistema GPR moderno, tal como se conhece hoje, foi desenvolvido pelo exército dos Estados Unidos durante a guerra do Vietnã com o objetivo de localizar labirintos e túneis construídos no subsolo pelos vietnamitas do norte.

O GPR funciona de modo similar a um eco-batímetro ou ao método sísmico de reflexão, ou seja, emite ondas para a subsuperfície e capta as ondas que retornam a ela. Porém, no caso da sísmica de reflexão as ondas são acústicas e respondem às propriedades acústicas do meio, enquanto que no GPR as ondas são eletromagnéticas e respondem às propriedades elétricas do meio, principalmente à variação das constantes dielétricas.

É conhecida a eficácia do georadar na detecção, no mapeamento e na determinação da profundidade de tubulações enterradas em subsuperfície. Este trabalho visa a testar o desempenho de antenas com diferentes frequências (100 MHz, 125 MHz, 200 MHz, 300 MHz

e 400 MHz) em diferentes tipos de solos na localização e determinação das profundidades em que se encontram enterradas as tubulações. Vale esclarecer que existem diferentes fatores como, diferentes saturações e concentrações de argila que afetam a amplitude do pulso de radar. É conhecido na literatura científica internacional que grandes concentrações de certos tipos de argilas e o aumento do grau de saturação do solo, tornam o solo eletricamente mais condutivo o que aumenta a atenuação do pulso eletromagnético.

Os sistemas de GPR utilizados neste trabalho foram o RAMAC da empresa sueca Mala Geoscince e o equipamento ucraniano VIY 2 fabricado pela empresa Transient Technologies. As antenas foram usadas no modo afastamento constante e os dados do RAMAC foram processados através do programa REFLEXW 5.0, desenvolvido e comercializado pela empresa alemã Sandmeier Scientific Software, enquanto que os do VIY 2 foram processados no *software* Synchro2, desenvolvido e distribuído pela própria empresa fabricante do radar.

Emprega-se também neste trabalho o método de eletrorresistividade, o qual tem dupla finalidade. Primeiramente medir através de caminhamentos elétricos 2D as resistividades do solo abaixo de algumas seções onde se realizou perfis com o georadar, afim de entender o bom ou o mau desempenho do GPR. Além disso foi realizada uma primeira tentativa de se identificar a presença de alguma tubulação metálica na área, invertendo os dados e procurando por anomalias na resistividade elétrica.

O caminhamento elétrico 2D foi realizado com o equipamento Siscal Pro Switch 72 da empresa francesa IRIS Instruments. Esses dados foram convertidos para o formato .DAT através do programa Prosys II, fornecido juntamente com o equipamento, e então processados no *software* Res2Dinv versão 3.4 da empresa malaia Geotomo Software.

A correlação entre as qualidades dos dados das antenas de GPR utilizadas neste trabalho, com os valores de resistividade aparente medidos através do método eletrorresistivo serviu para proporcionar um maior entendimento sobre a aplicabilidade e limitações do uso do radar de solo para o mapeamento de tubulações em subsuperfície. Os resultados desta pesquisa servirão como guias para o planejamento de futuros projetos que utilizem o GPR para tal fim, de modo a se evitar contratos que não gerem resultados conclusivos que possam ser utilizados pela indústria.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: O capítulo 1 apresenta uma fundamentação dos métodos geofísicos aplicados; conceitos, princípios de funcionamento e métodos de aquisição existentes dos métodos de GPR e eletrorresistividade.

O capítulo 2 trata da execução do trabalho. Nele são descritos as etapas necessárias que foram realizadas antes do campo, onde foram feitos os levantamentos de campo, os equipamentos e as configurações utilizadas em cada um dos equipamentos e o processamento que foi realizado nos dados, descrevendo cada uma das etapas.

No capítulo 3 são apresentados os resultados obtidos em cada um dos locais estudados de modo a ilustrar a aplicação do método GPR em áreas distintas, bem como correlacionar a qualidade do dado do radar com a resistividade aparente e saturação em água do subsolo do local de aquisição dos dados.

Nesta pesquisa observou-se que nas três travessias de rios estudadas, ou seja, Rio Real, Rio Sauípe e Rio Quiricó Grande, quando a resistividade está acima de 90 ohm.m é boa a qualidade dos dados do sistema RAMAC e VIY 2, mas quando a resistividade está abaixo deste valor o sistema RAMAC tem o sinal bastante atenuado, não sendo possível determinar as hipérbolas difractoras. O sistema VIY 2 de 125 MHz foi o que apresentou melhor qualidade dos dados, pois foi capaz de detectar mais hipérbolas ou detectar maiores detalhes destas (um ápice e duas pernas) nas mesmas seções.

Por fim é apresentada a conclusão do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 1

Fundamentação Teórica

O GPR é um método utilizado pela geofísica que emprega ondas eletromagnéticas em frequências que vão de 10 a 2500 MHz para localizar estruturas, feições geológicas ou objetos enterrados em subsuperfície. Neste método a antena transmissora irradia para o solo uma onda eletromagnética de frequência pré-definida. Variações nas propriedades elétricas do meio, principalmente da condutividade elétrica e da permissividade dielétrica, fazem com que parte do sinal seja refletido para a superfície e parte continue se propagando em subsuperfície. O sinal refletido é captado por uma antena receptora, amplificado, digitalizado e armazenado em uma unidade controladora (computador). O sinal é armazenado em função do seu tempo duplo de trânsito, ou seja, o tempo que a onda eletromagnética leva para percorrer o caminho: antena transmissora - interface refletora - antena receptora. Este tempo é da ordem de nanosegundos ($1\text{ns} = 10^{-9}\text{ s}$), por isso a instrumentação do GPR é bastante precisa na medição do tempo de trânsito. Esta informação (sinal captado pela antena receptora) permite o imageamento da subsuperfície com uma resolução que depende da frequência utilizada. Quanto maior a frequência, melhor será a resolução, mas menor a profundidade investigada.

O GPR pode ser aplicado na resolução dos mais diversificados problemas, como pode ser visto em Harrison (1970), Campbell e Orange (1974) e Annan e Davis (1976) na determinação das espessuras das camadas de gelo da Antártica e do Ártico; Thierbach (1974) e Unterberger (1978) para detectar fraturas em rochas de sal; Bevan e Kenyon (1975) em investigações arqueológicas; Coon et al. (1981) para investigações em corpos de carvão; Davis et al. (1985) na exploração de depósitos de placer; Botelho (2007) e Botelho (2008) na prospecção de manganês; Darracott e Lake (1981) , Ulriksen (1982) , Leggo e Leech (1983) e Davis e Annan (1989) na engenharia civil e na solução de problemas geológicos; Benson (1995), na determinação da profundidade do nível freático, Castro e Branco (2003), na localização de poluentes no subsolo, Botelho e Jorge (2005), em investigações geotécnicas das subestruturas de ferrovias. Com objetivo de localizar tubulações citam-se: Mendes (2008), Dias (2008) e Pinto (2010).

Outro método muito utilizado pela geofísica é o método de eletrorresistividade. Neste

método uma corrente elétrica artificialmente gerada é injetada no solo por eletrodos conectados diretamente ao mesmo e é medido o potencial elétrico em outros dois eletrodos. As variações nos potenciais permitem discriminar materiais de propriedades elétricas distintas. Este método é mais utilizado hoje em dia para fins de mapeamentos hidrogeológicos de aquíferos como pode ser visto em Freitas (2008) ou em mapeamentos cujo objetivo é geoambiental como em Ribeiro (2008) e em Porciúncula (2007).

1.1 Propagação de ondas eletromagnéticas

Como o GPR é um método eletromagnético seu funcionamento baseia-se no princípio de transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas. A fundamentação teórica é baseada nas equações de Maxwell, que descrevem o comportamento dos fenômenos eletromagnéticos com base em cinco campos vetoriais que são: \vec{B} (indução magnética, em Weber/m²), \vec{H} (campo magnético, em A/m), \vec{E} (campo elétrico, em V/m), \vec{J} (densidade de corrente elétrica, em A/m²) e \vec{D} (vetor deslocamento elétrico, em C/m²).

A primeira equação é conhecida como Lei de Ampère e relaciona o campo magnético (\vec{H}) com as correntes elétricas (Equação 1.1):

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.1)$$

As correntes de deslocamento ($\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$) são associadas às cargas que se movimentam polarizadas pela influência de um campo elétrico externo, ocorrendo, durante esse movimento, uma transferência de energia do campo elétrico para o meio, que irá liberar essa energia armazenada devido ao retorno das cargas à posição de equilíbrio quando o campo elétrico for retirado.

A segunda equação é conhecida como Lei de Faraday e descreve o campo elétrico (\vec{E}) produzido pela variação do campo indução magnética em relação ao tempo (Equação 1.2):

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.2)$$

O acoplamento das equações de Maxwell é conseguido através das relações constitutivas, empíricas, que valem-se das propriedades elétricas e magnéticas dos materiais para relacionar o campo elétrico externo aplicado e o campo interno (Sato, 1999), permitindo com isto, a obtenção de informações sobre as propriedades elétricas dos materiais por onde as ondas se propagaram.

A primeira relação constitutiva é chamada de Lei de Ohm (Equação 1.3):

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.3)$$

Onde σ é a condutividade elétrica. Em meios isotrópicos a condutividade elétrica é uma grandeza escalar enquanto que em meios anisotrópicos ela é um tensor. Essa relação descreve o fluxo de cargas livres por uma corrente quando um campo elétrico está presente. Ao cessar o campo elétrico, cessa o movimento das cargas que, para ambientes geológicos rasos, tem como formas mais importantes os elétrons dos minerais metálicos e os íons contidos nas soluções eletrolíticas presentes nos poros, fissuras e fratura das rochas. Esse fenômeno é conhecido como corrente de condução. A condutividade elétrica afeta diretamente a atenuação das ondas do radar e é um parâmetro importantíssimo que deve ser observado na aplicação do método GPR.

A segunda relação constitutiva relaciona o vetor deslocamento elétrico \vec{D} e o campo elétrico \vec{E} (Equação 1.4):

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (1.4)$$

onde o parâmetro ε é chamado de permissividade dielétrica. Sendo que, o parâmetro mais utilizado é a permissividade relativa ou constante dielétrica (ε_r), que é a razão entre a permissividade do material e a permissividade do vácuo: $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ (Annan e Cosway, 1992).

A permissividade dielétrica relativa varia de 1 a 81 como mostra a tabela 1.1 e no ambiente terrestre é fortemente controlada pela presença de água, por isso esta propriedade é a mais importante em trabalhos com GPR afetando diretamente a velocidade de propagação das ondas do radar.

A terceira relação constitutiva relaciona a indução magnética \vec{B} e o campo magnético \vec{H} (Equação 1.5):

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.5)$$

onde μ é a permeabilidade magnética.

Normalmente desconsidera-se o efeito da permeabilidade magnética ao se realizar levantamentos com GPR, pois, para a maioria dos materiais geológicos pode-se considerar $\mu = \mu_0$, que é a permeabilidade magnética do vácuo e vale $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Sendo assim, a permeabilidade magnética relativa é $\mu_r = \mu/\mu_0 = 1$.

Em geral, a condutividade é dominante para ondas eletromagnéticas de baixa frequência (< 1 MHz), enquanto que, para ondas de alta frequência (> 1 MHz) a permissividade dielétrica é dominante (Ward, 1987).

Materiais Secos	ϵ_r	σ_0 (mS/m)	Materiais Saturados	ϵ_r	σ_0 (mS/m)
Ar	1	0	Água destilada	81	0,01
Areia de cascalho	2 - 6.	0,01	Água fresca	81	0,5
Argila	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e Silte	5	1	Areia	20 - 30	0,1 - 1
Calcário	4	0,5	Silte	10	1 - 10.
Solo arenoso	2,6	0,14	Argila	40	1000
Solo argiloso	2,4	0,27	Solo arenoso	25	6,9
Sal	5 - 6.	0,01 - 1	Solo argiloso	15	50
Granito	5	0,01	Arenito	20 -30	40
Basalto	6	1	Siltito	30	100
Diabásio	7	10	Folhelho	7	100
Ferro	1	109	Calcário	8	2
PVC	8	0	Granito	7	1
Asfalto	3 - 5.	0	Basalto	8	10
Concreto	5,5	0	Diabásio	8	100
			Concreto	12,5	0

Tabela 1.1: Permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) e condutividade elétrica (σ_0) observadas nos materiais. (Davis e Annan, 1989).

A velocidade de propagação (ϑ) e a atenuação (α) são os fatores mais importantes que governam a propagação de ondas eletromagnéticas num determinado meio e estão condicionados às propriedades elétricas, tais como constante dielétrica e condutividade.

De acordo com Davis e Annan (1989), a constante dielétrica relativa é dada pela equação 1.6:

$$\epsilon_r = \epsilon' + i\epsilon''' \quad (1.6)$$

Separando-se ϵ''' em seus componentes de alta frequência e condutividade, pode-se escrever a constante dielétrica como mostra a equação 1.7:

$$\epsilon_r = \epsilon' + i \left[\epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right] \quad (1.7)$$

Onde σ é a condutividade (em S/m); ω é a frequência angular ($2\pi f$); ϵ_0 é a permissividade do vácuo que vale $8,854 \times 10^{-2}$ F/m, e ϵ'' é um termo dependente da frequência, relativo às perdas associadas ao fenômeno de relaxação da molécula de água, que só influencia o método do georadar quando se utiliza frequências superiores a 1 GHz, que não é o

caso deste trabalho.

A velocidade da onda eletromagnética é dada pela equação 1.8:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2}}{2}}} \quad (1.8)$$

Onde c é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo e vale 3×10^8 m/s.

Para materiais geológicos com baixa perda, como areia e cascalho, a influencia da condutividade (σ) na variação da frequência (ω) é mínima de forma que pode-se considerar o termo $\sigma/\omega\epsilon = 0$. Sendo assim, o campo eletromagnético propaga-se com uma velocidade que depende essencialmente da constante dielétrica relativa (ϵ_r) dos materiais como mostra a equação 1.9.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.9)$$

A tabela 1.2 apresenta os valores das velocidades da onda eletromagnética para alguns materiais geológicos e artificiais.

A figura 1.1 ilustra os principais processos de perda de energia do sinal eletromagnético.

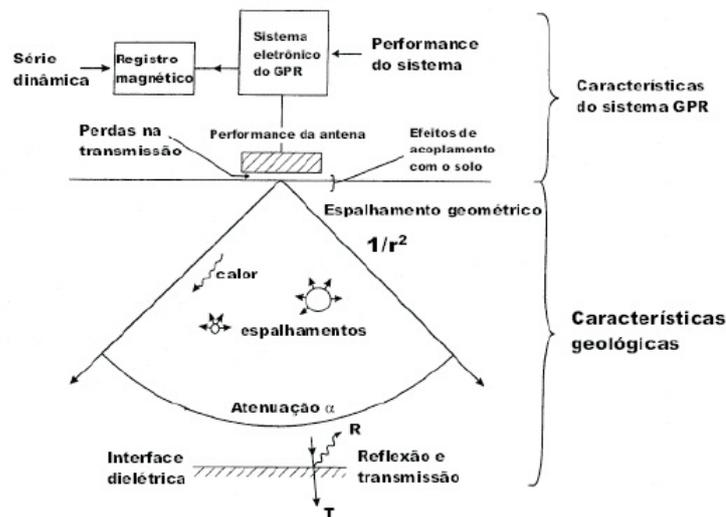


Figura 1.1: Principais processos que provocam a perda do sinal eletromagnético (Reynolds, 1997).

A principal causa da perda energética é a atenuação, que é uma função complexa das propriedades elétricas e dielétricas do meio em que o sinal se propaga. Em meios resistivos a

Material	ϵ_r	ϑ (mm/ns)
Ar	1	300
Água doce	81	33
Água do mar	81	33
Neve polar	1,4 - 3	194 - 252
Gelo polar	3 - 3,15	168
Gelo temperado	3,2	167
Gelo puro	3,2	167
Lago congelado (água doce)	4	150
Gelo do mar	2,5 - 8	78 - 157
Permafrost (solo congelado)	1 - 8.	106 - 300
Areia da praia	10	95
Areia seca	3 - 6.	120 - 170
Areia saturada	25 - 30	55 - 60
Silte saturado	10	95
Argila saturada	8 - 15.	86 - 100
Solo argiloso seco	3	173
Pântano	12	86
Campo agrícola	15	77
Campo de pastagem	13	83
Solo comum	16	75
Granito	5 - 8.	106 - 120
Calcário	7 - 9.	100 - 113
Dolomito	6,8 - 8	106 - 115
Basalto	8	106
Xisto	7	113
Arenito	6	112
Carvão	4 - 5.	134 - 150
Quartzo	4,3	145
Concreto	6 - 30.	55 - 112
Asfalto	3 - 5.	134 - 173
PVC (polímero)	3	173

Tabela 1.2: Valores da permissividade dielétrica relativa (ϵ_r) e velocidades da onda eletromagnética (ϑ) para alguns materiais geológicos e artificiais (Reynolds, 1997)

atenuação do sinal do georadar é expressa pela equação 1.10, de acordo com (Davis e Annan, 1989):

$$\alpha = \frac{1,69 \times 10^3 \sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} dB/m \quad (1.10)$$

Onde $\sigma = \sigma_{dc} + \omega \epsilon'' \epsilon_0$ e associa a condutividade de corrente contínua (D.C) e as perdas dielétricas.

Quando a onda eletromagnética emitida pelo GPR atinge uma interface (superfície que separa meios de propriedades elétricas distintas) parte do sinal é refletido e parte se propaga com uma energia menor. Também ocorre perda energética do sinal quando este passa por objetos que possuem dimensão menor ou igual ao comprimento de onda propagado, caso onde irá ocorrer o fenômeno denominado de difração. Neste caso a energia é espalhada de maneira aleatória o que gera ruídos nos radargramas. O fenômeno da absorção também causa perda de energia, pois neste caso a energia eletromagnética será transformada em energia térmica. A antena transmissora do GPR emite um pulso em forma de cone cuja abertura é aproximadamente 90° . À medida que este pulso se propaga no meio ele sofre um espalhamento geométrico que é responsável também por diminuir sua energia por unidade de área a uma taxa de $1/r^2$, onde r é a distância percorrida em relação à fonte.

Além dos processos acima citados existe ainda um outro parâmetro importante para o estudo do alcance do sinal de radar que é o Skin Depth (δ). Este parâmetro tem por definição a profundidade na qual o sinal diminui sua amplitude a $1/e$ (37%) do seu valor inicial. A equação 1.11 encontrada em Reynolds (1997) define o Skin Depth como:

$$\delta = 5,31 \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\sigma} \quad (1.11)$$

Onde σ é dado em mS/m e considerando que a razão $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$.

Levando em consideração a atenuação, o skin depth, o tamanho e a profundidade do alvo a ser investigado, deve-se escolher a frequência do equipamento respeitando o fato de que frequências elevadas possuem melhor resolução vertical, ou seja, possuem uma grande capacidade de distinguir refletores próximos, porém possuem uma profundidade de investigação muito baixa. Antenas de frequências mais baixas conseguem extrair informações de profundidades maiores, porém perdem resolução vertical. A tabela 1.3 mostra uma estimativa das profundidades de investigação máxima de acordo com cada frequência do GPR.

Frequência central (MHz)	Profundidade máxima de penetração (m)
900	1
400	4
270	6
200	9
100	15
16 - 80	até 50

Tabela 1.3: Estimativa da profundidade máxima de penetração em função da frequência central das antenas. Fonte: (<http://www.alphageofisica.com.br/gssi/gpr.htm>)

1.2 Funcionamento do GPR

O GPR nos fornece um traço como resposta da propagação da onda eletromagnética em cada ponto do terreno amostrado. Este traço possui amplitudes proporcionais ao contraste elétrico dos materiais por onde a onda se propagou e quando são colocados lado a lado formam uma imagem da subsuperfície a qual denomina-se radargrama. A figura 1.2 ilustra tal fato.

O modo mais comum de operação do georadar é denominado de afastamento constante ou *common-offset*. Nesta técnica as antenas transmissoras e receptoras são mantidas à uma distância fixa constante e todo este conjunto é transportado na superfície ao longo da seção. Mesmo a distância entre as antenas transmissoras e receptoras sendo muito pequena, deve-se levar em consideração tal distância durante o processamento. O resultado deste modo de aquisição é um radargrama onde no eixo vertical tem-se a medida do tempo duplo de trânsito da onda em nanosegundos e no horizontal tem-se o tamanho da seção em metros. Vide figura 1.2.

1.3 Método Eletrorresistivo

O método eletrorresistivo baseia-se na medida da diferença de potencial elétrico entre dois pontos causada pela introdução artificial de uma corrente elétrica de baixa frequência no meio geológico subterrâneo. Com esta diferença de potencial é possível determinar a distribuição das propriedades elétricas em subsuperfície (Sato, 1999).

O método geoeletrico possui sua origem no século XVIII com a descoberta da resistividade das rochas por Gray & Wheeler em 1720 e da condutividade dos solos por Watson em 1746. Os primeiros trabalhos de aplicação deste método datam do início do século XX

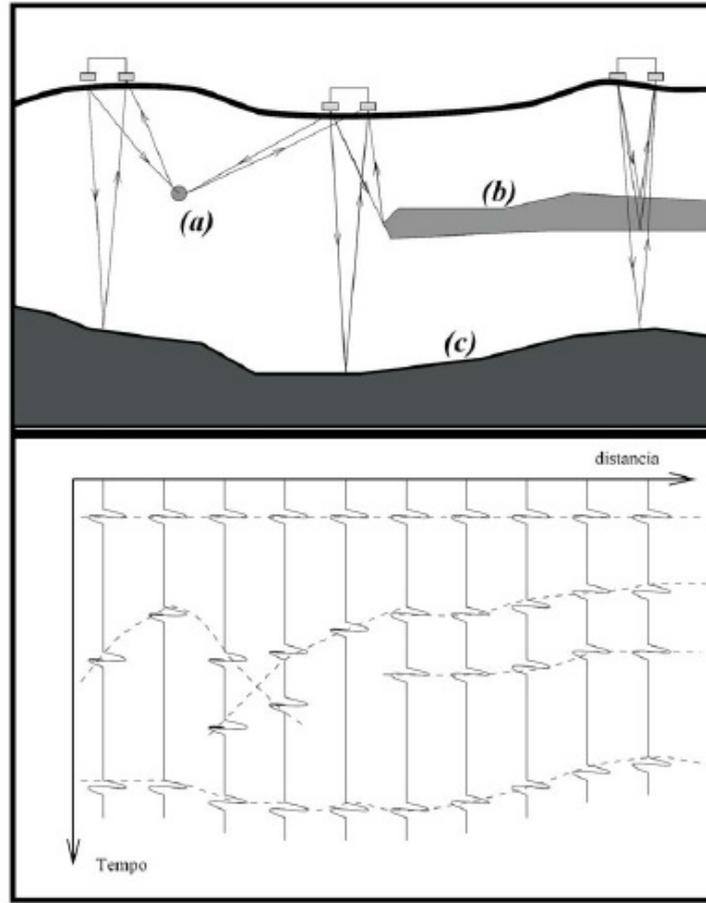


Figura 1.2: Alvos de radar e suas respectivas imagens. a) alvo pontual; b) camada com borda abrupta; c) embasamento ou interface entre duas camadas. O primeiro e o segundo caso produzem hipérboles de difração (Mello, 2008).

e visaram a exploração mineral. Entre os principais pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento do método elétrico estão Conrad Schlumberger e Frank Wenner os quais foram os responsáveis pela introdução de arranjos que utilizam quatro eletrodos para medir a resistividade da subsuperfície, sendo dois de potencial e dois de corrente.

Na maioria dos equipamentos o método galvânico é utilizado, devendo, portanto, estar os quatro eletrodos conectados diretamente ao solo. Como pode ser visto na figura 1.3 os eletrodos C1 e C2 são os eletrodos de corrente e servem para injetar a corrente elétrica artificial no solo, enquanto os eletrodos P1 e P2 são os de potencial e servem para realizar a medição da diferença de potencial (ΔV) entre eles.

Sabendo-se a diferença de potencial (ΔV), a corrente (I) e o fator geométrico (κ), que é função da configuração da disposição dos eletrodos no terreno e é dado pela equação 1.12, pode-se calcular a resistividade aparente do meio através da equação 1.13.

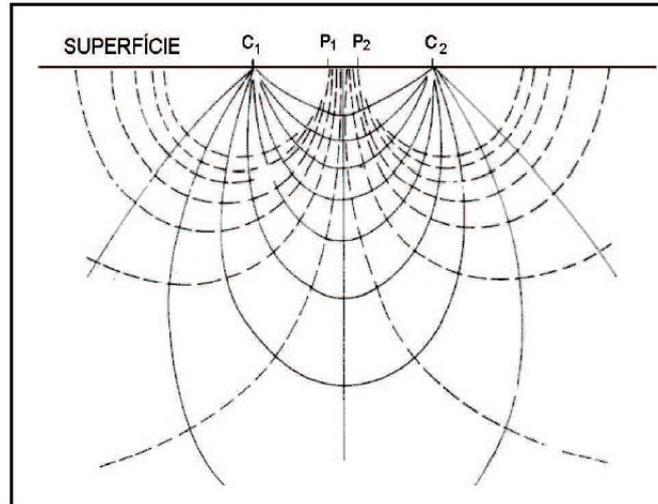


Figura 1.3: Esquema da distribuição dos eletrodos no solo durante uma aquisição de eletrorresistividade. As linhas cheias indicam o fluxo de corrente, enquanto que as linhas tracejadas indicam as linhas de equipotenciais geradas pela corrente (Dias, 2008).

$$\kappa = \frac{2\pi}{\frac{1}{R_{C_1P_1}} - \frac{1}{R_{C_2P_1}} - \frac{1}{R_{C_1P_2}} + \frac{1}{R_{C_2P_2}}} \quad (1.12)$$

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} \kappa \quad (1.13)$$

Onde ρ_a é a resistividade elétrica aparente do meio; $R_{C_1P_1}$, $R_{C_2P_1}$, $R_{C_1P_2}$ e $R_{C_2P_2}$ são as distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial.

Os arranjos mais comuns aplicados em campo são:

- Arranjo Schlumberger (figura 1.4)

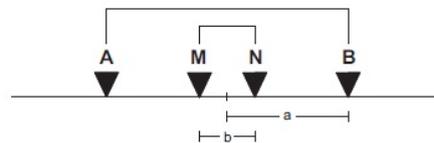


Figura 1.4: Modelo esquemático do arranjo de eletrodos Schlumberger (Ribeiro, 2008).

Sendo $AB/2 = a$ e $MN = b$ tem-se $\kappa = \pi\left(\frac{a^2}{b} - \frac{b}{4}\right)$

- Arranjo Wernner (figura 1.5)

Sendo $AM = MN = NB = a$ tem-se $\kappa = 2\pi a$

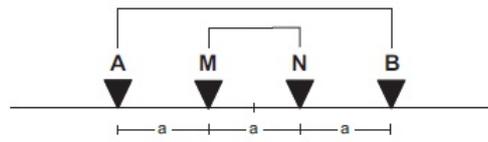


Figura 1.5: Modelo esquemático do arranjo de eletrodos Wenner (Ribeiro, 2008).

- Arranjo dipolo-dipolo (figura 1.6)

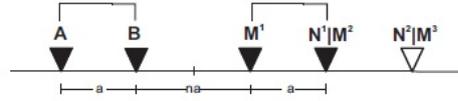


Figura 1.6: Modelo esquemático do arranjo de eletrodos dipolo-dipolo (Ribeiro, 2008).

Sendo $AB = MN = a$ e $BM = na$ tem-se $\kappa = \pi an(n + 1)(n + 2)$

Independente do arranjo utilizado o método de eletrorresistividade pode ser utilizado para investigações 1D (onde a resistividade aparente é dada em função da profundidade) através da sondagem elétrica vertical (SEV), ou para investigações 2D (onde a resistividade aparente é dada em função da profundidade e da distância horizontal) através do caminhamento elétrico. Equipamentos mais modernos permitem ainda uma distribuição dos eletrodos na superfície em uma determinada área, conseguindo com isto uma investigação 3D da subsuperfície.

A tabela 1.4 mostra um intervalo bem amplo de resistividade para alguns materiais geológicos. Para maiores detalhes sobre o cálculo dessas resistividades vide Freitas (2008).

Material	Resistividade ($\Omega.m$)
Argila	1 - 100
Argila úmida	1 - 20
Areia	200 - 3000
Arenitos	1 - 1.000.000
Rocha metamórfica	50 - 1.000.000
Rocha ígnea	100 - 1.000.000

Tabela 1.4: Intervalos de resistividades elétrica de alguns materiais geológicos (Telford et al., 1990) (adaptado).

CAPÍTULO 2

Aquisição dos Dados

A primeira etapa da pesquisa foi o estudo dos fundamentos teóricos que envolvem os métodos de GPR e eletrorresistividade. Após a assimilação dos conceitos teóricos de ambos os métodos, o objetivo foi aprender a operar os equipamentos, no caso, o VIY 2 e o Syscal Pro Switch 72 para levantar os perfis de GPR e eletrorresistividade. O RAMAC, utilizado nesta pesquisa, é de propriedade da empresa GPR Geofísica, contratada para dar suporte à Universidade na aquisição dos dados do projeto.

A aquisição dos dados em campo dependeram do atendimento de requisitos estabelecidos pela TRANSPETRO/PETROBRAS, como a participação em curso de integração e de solicitante de permissão de trabalho, exigidos e ministrados pela própria TRANSPETRO. As aquisições dos dados de radar foram realizadas em diversas campanhas ocorridas entre os meses de agosto e novembro de 2011. Os dados de eletrorresistividade foram coletados no mês de novembro de 2011.

Findada a etapa de aquisição a etapa seguinte consistiu do processamento e interpretação dos dados coletados e posterior confecção deste trabalho.

2.1 Equipamentos utilizados

2.1.1 Sistema RAMAC

Este sistema é fabricado pela empresa sueca Mala Geoscience e consiste de quatro módulos (antena transmissora, antena receptora, unidade de controle e unidade de apresentação e armazenamento de dados que é um notebook) interligados por cabos de fibra ótica e serial como mostra a figura 2.1. Neste trabalho foram utilizadas antenas não blindadas que possibilitam investigações mais profundas cujas frequências foram 100 MHz, 200 MHz e 400 MHz.



Figura 2.1: Imagem ilustrativa do sistema RAMAC

2.1.2 Sistema VIY 2

Este GPR foi desenvolvido pela empresa ucraniana Transient Technologies e consiste de um único módulo onde se encontram as antenas transmissoras e receptoras, além das baterias (caixa branca da figura 2.2) que é ligado à porta USB de um notebook através de um cabo comunicador RS232/USB1. No notebook deve-se instalar o programa synchro2 disponibilizado gratuitamente em www.viy.ua/e/downloads, o qual permite definir as configurações que as antenas devem operar durante a aquisição dos dados e ainda é responsável por visualizar e armazenar os dados na memória do computador, além de realizar o processamento ou a conversão de formato dos dados obtidos. Neste sistema foram utilizadas antenas de 125 MHz e 300 MHz. Vide imagem do sistema na figura 2.2.

2.1.3 Syscal Pro Switch 72

Este equipamento é fabricado pela empresa francesa IRIS Instruments. Ele consiste de uma unidade controladora, 4 rolos de cabo, 72 eletrodos (hastes metálicas), 72 conectores (ligam os eletrodos ao cabo). O instrumento possui bateria interna, mas permite que seja utilizada bateria externa 12 V automotiva. Vide imagem do equipamento na figura 2.3



Figura 2.2: Imagem ilustrativa do sistema VIY 2



Figura 2.3: Imagem ilustrativa do Syscal Pro Switch 72

2.2 Local de Aquisição

Os dados que constam neste trabalho foram adquiridos na faixa GASEB (Gasoduto Sergipe-Bahia) da Transpetro, mais especificamente nas travessias (locais onde um rio corta a faixa

de dutos) dos rios Real, Sauípe e Quiricó Grande. Todos estes rios estão localizados no estado da Bahia, na região que compreende o litoral norte do estado até a divisa com o estado de Sergipe. A figura 2.4 mostra o local aproximado das travessias no mapa.

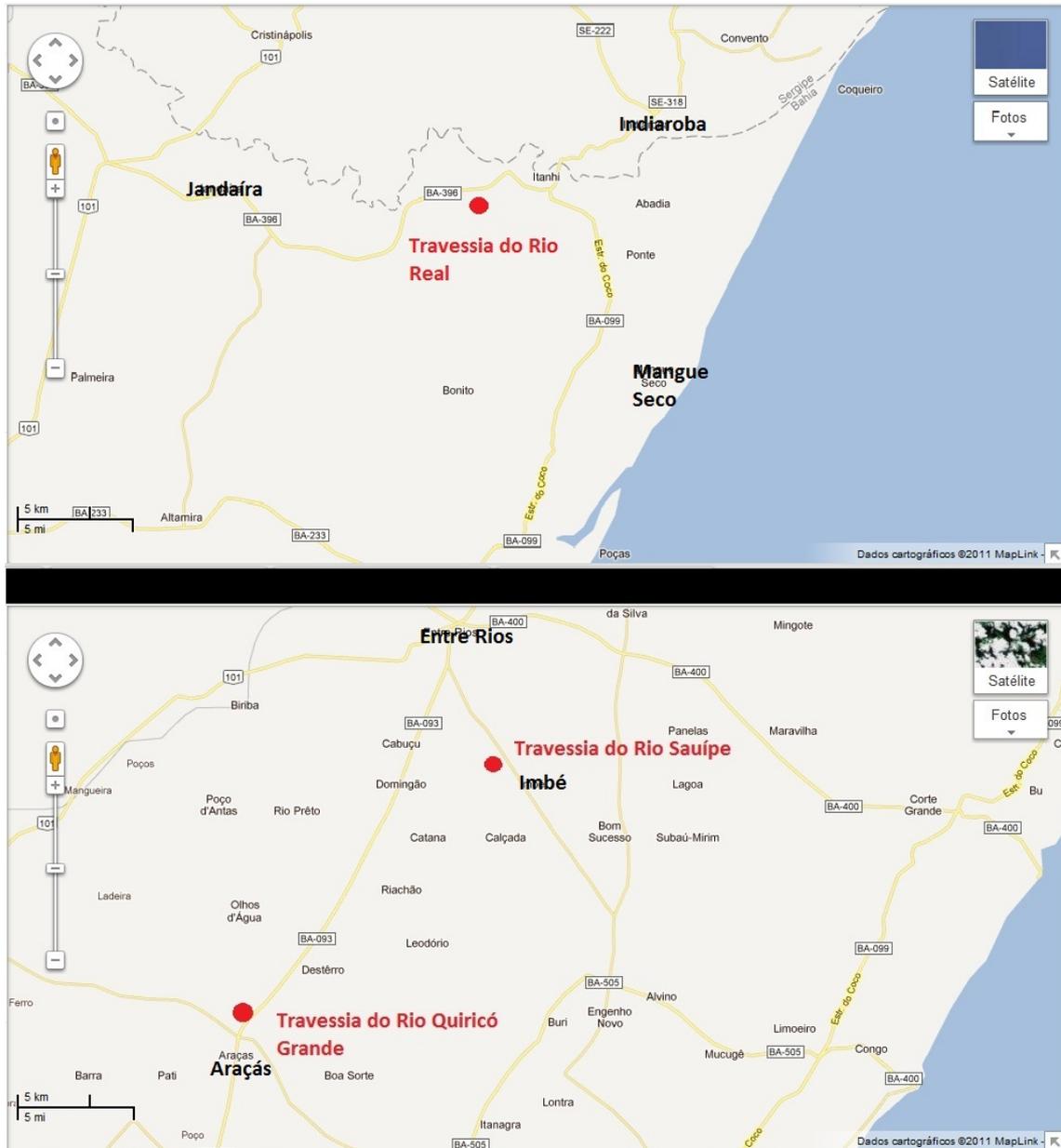


Figura 2.4: Mapa de parte do litoral norte baiano contendo os locais das travessias.
(www.googlemaps.com.br)

O primeiro passo em campo foi o georreferenciamento (cujo os dados não estão incluídos neste trabalho) e a definição das seções onde foram adquiridos os dados de GPR e eletrorresistividade. A primeira seção foi posicionada o mais próximo possível da margem do rio, sendo que a segunda, terceira, quarta e quinta seções distam da primeira seção 10 m, 20 m, 30 m e 50 m respectivamente. Todas as seções foram posicionadas transversalmente à

faixa de dutos. Esse arranjo foi feito em ambas as margens dos rios e foi escolhido de forma a testar o desempenho dos georadares sobre diferentes distâncias dos rios e provavelmente, diferentes conteúdos de água no solo. A figura 2.5 ilustra o esquema descrito anteriormente.

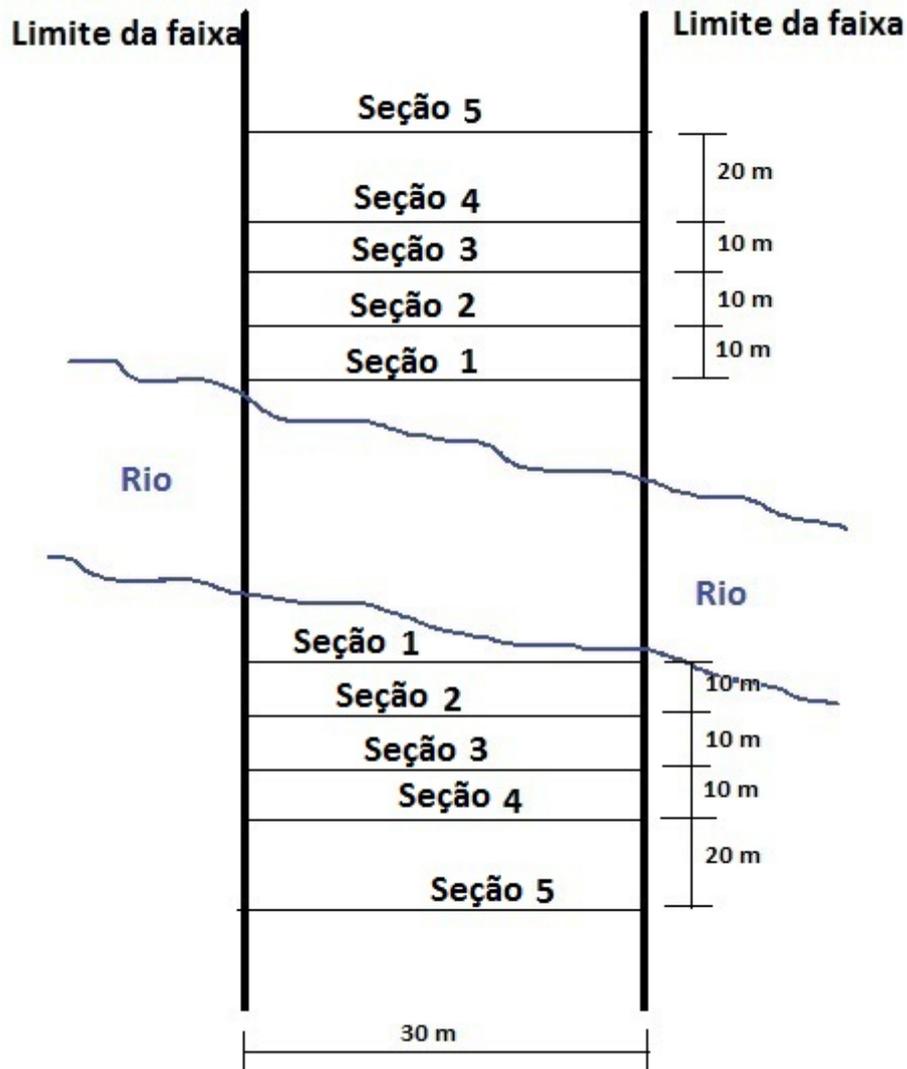


Figura 2.5: Croqui das seções de GPR e eletrorresistividade

A largura da faixa é de 30 m, porém algumas seções não possuem este comprimento devido a obstáculos naturais, tais como, barrancos, regiões alagadas e vegetação densa, que existem na borda de algumas travessias. Os radargramas apresentados no capítulo 3 exibem o comprimento exato de cada seção.

O sistema RAMAC foi operado de forma a coletar um traço a cada 5 cm, com 512 amostras por traço, no modo afastamento constante e com separação de antenas de 1 m para a frequência de 100 MHz e de 0,6 m para as frequências de 200 e 400 MHz.

O sistema VIY 2, pertencente à UFBA, não dispunha de odômetro, mas foi ajustado

de modo que cada seção de 30 m possui um número de traços que varia de 600 a 750 em sua maioria, o que resulta em 1 traço a cada 4 a 5 cm aproximadamente. Esta pequena diferença se deve à velocidade de caminhamento do operador do equipamento em cada seção, mesmo tendo se tomado o máximo de cuidado para que esta velocidade fosse uniforme. Neste sistema deve-se determinar a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio da subsuperfície antes de se iniciar a aquisição dos dados e neste trabalho foi definida como 0,1 m/ns. Este equipamento não foi utilizado na travessia do Rio Quiricó Grande.

Os perfis de eletrorresistividade foram coletados apenas nas seções 1 a 5 dos rios Quiricó Grande e Sauípe, sendo que no primeiro foram coletados dados apenas na margem direita, devido ao fluxo de veículos ter impossibilitado a aquisição na margem esquerda.

O equipamento Syscal Pro Switch 72 foi operado alimentado por bateria externa 12 V, utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo com separação de eletrodos de 1 m. Este arranjo foi escolhido, pois fornece uma densidade de pontos de medida maior que os demais arranjos, além do tempo de aquisição ser muito menor, pois o Syscal Pro Switch 72 consegue fazer medidas simultâneas durante a aquisição com este arranjo.

2.3 Processamento dos dados

Nesta seção será discutido o processamento realizado nos dados fornecidos pelos diferentes métodos e equipamentos utilizados neste trabalho.

2.3.1 Processamento dos dados do RAMAC

Os dados do RAMAC foram processados no *software* REFLEXW 5.0. Inicialmente os dados que são gerados pelo RAMAC na extensão (.RD3) foram importados pelo REFLEXW e ao final deste processo foram gerados arquivos na extensão (.DAT). Em seguida os dados sofreram os processos descritos resumidamente nos itens abaixo na ordem em que são apresentados. Para maiores detalhes sobre técnicas de processamento de dados de GPR vide Neto (2006). Existem processamentos especiais para colapsar as hipérbolas e, através deste artifício, estimar a velocidade de propagação do pulso GPR que incide nos tubos como pode ser visto em Jaya et al. (1999), ou mesmo realizar correção topográfica de modo simultâneo com a migração (Pestana e Botelho, 1997). Nesta pesquisa não utilizou-se o recurso da migração no processamento dos dados GPR.

- Filtragem Dewow

O WOW é um ruído que corresponde a um componente transiente de baixa frequência que provoca uma saturação de alta amplitude e baixa frequência a poucos comprimentos de onda da fonte, contaminando o dado e dificultando ou impossibilitando a

visualização de eventos na frequência da antena. A filtragem Dewow é, portanto, o passo inicial do processamento.

- *Move start-time* (Redução ao tempo zero)

Esta etapa do processamento corrige o deslocamento do tempo zero. O primeiro evento a ser identificado num traço de radar é a chegada da onda direta pelo ar, cujo tempo de chegada ou tempo-zero, depende do afastamento das antenas. Após esta etapa os refletores são reposicionados acima das posições anteriores.

- *Static Correction* (correção estática)

A correção estática corrige o efeito do desalinhamento em tempo, dos traços do radargrama. Este desalinhamento é provocado por saltos que as antenas do GPR sofrem durante a aquisição quando são arrastadas em terrenos irregulares ou pedregosos.

- Ganho *energy decay* (ganho de decaimento de energia)

Ao se propagar no meio geológico o pulso do GPR sofre atenuação (mudança de amplitude e forma do pulso) por causa dos efeitos absorcivos e dispersivos. O ganho de decaimento de energia é uma função que aplica um ganho linear para corrigir o efeito da diminuição de energia com o afastamento da fonte (espalhamento geométrico) e uma função exponencial que atua compensando o efeito da perda de amplitude por absorção.

- *Background removal* (remoção de background)

Devido à existência da indução eletromagnética (propagação da onda eletromagnética da antena transmissora até a antena receptora pelo ar quase sem atenuação deste sinal) o dado fica contaminado principalmente nos tempos iniciais, pois existe a superposição desta onda, cujas amplitudes são elevadas, com as ondas que se propagam em subsuperfície, cujas amplitudes são baixas. A correção deste efeito indutivo entre as antenas é realizada pelo filtro *background removal* que calcula a média da amplitude dos traços do radargrama em uma janela de tempo definida e subtrai esta média dos traços originais.

- Filtragem FK

A filtragem FK foi usada nestes dados com o objetivo de reduzir a intensidade, ou até mesmo remover, refletores e ruídos, neste caso, horizontais que dificultavam a clara visualização das hipérboles, que nada mais são que a representação gráfica nos radargramas dos alvos deste estudo (dutos).

- *Time Cut*

O *time cut* foi uma ferramenta utilizada apenas para melhorar a visualização dos radargramas. Esta ferramenta permite selecionar o tempo máximo que será mostrado

no radargrama, permitindo com isto, descartar informações irrelevantes de maiores profundidades e melhorar a visualização das informações relevantes das profundidades menores.

- Definição das velocidades por análise das hipérboles

A análise da velocidade do subsolo foi feita através do ajuste de hipérboles. Este método de tentativa e erro, apesar de estar sujeito a erros de ajuste visual feito pela pessoa que está processando, permite de maneira fácil, rápida e sem a necessidade de uma aquisição CMP, estimar a velocidade do meio no qual a onda se propagou.

- Conversão tempo-profundidade

A partir da análise feita no item anterior, foi utilizada a média das velocidades estimadas pelas hipérboles como velocidade do meio e a partir daí foi feita a conversão de tempo para profundidade, de modo a identificar quais as profundidades que os dutos se encontram enterrados.

2.3.2 Processamento dos dados do VIY 2

Os dados do VIY 2 foram processados no *software* synchro2. Os dados são gerados pelo VIY 2 na extensão (.sgpr) e são abertos pelo programa sem a necessidade de importação. Em seguida os dados sofreram os processos descritos resumidamente nos ítems abaixo na ordem em que são apresentados. Para maiores detalhes sobre os filtros do *software* synchro2 vide manual disponível em [www.viy.ua/download/UserManual\(e\).pdf](http://www.viy.ua/download/UserManual(e).pdf).

- *Background Remover*

A função deste filtro é a mesma explicada na subsecção 2.3.1. A janela utilizada foi inferior a 12% para que a amplitude dos refletores horizontais fosse reduzida.

- *Adaptive Filter*

Este filtro atua diminuindo o efeito das tiras verticais de diferentes larguras que aparecem no dado.

- *Compressor*

Este filtro atua aplicando ganho no dado. Atuando, portanto, de forma similar ao filtro de decaimento de energia descrito na subsecção 2.3.1.

- *TVGC (Time Varying Gain Control)*

Este filtro aplica um ganho em tempo no dado, complementando o *Compressor* e permitindo uma melhor visualização do radargrama.

2.3.3 Processamento dos dados do Syscal Pro Switch 72

Os dados foram extraídos da unidade controladora do equipamento através do *software* Prosys 2, fornecido juntamente com o equipamento. Este mesmo programa foi responsável pela conversão do arquivo para o formato (.DAT) que foi então processado utilizando-se o *software* RES2DINV.

Na tentativa de se obter uma anomalia de resistividade nos locais onde se encontram os dutos, foi utilizado o processo de inversão robusta do RES2DINV. Este tipo de inversão (descrita em detalhes no manual de uso do programa) é indicada quando se espera pontos cujas anomalias sejam abruptas, como era de se esperar no caso aqui estudado. Só foi possível ser usado este tipo de inversão devido ao número máximo de eletrodos usados ser 32 (valor considerado muito pequeno), mesmo exigindo um maior tempo de processamento computacional. Tomou-se, ainda, o cuidado de reduzir os efeitos dos blocos laterais, devido ao tamanho reduzido da seção transversal dos alvos e foram feitas iterações até que não fosse mais possível reduzir o erro RMS. A figura 2.6 ilustra o modelo de blocos utilizado e os pontos de medidas.

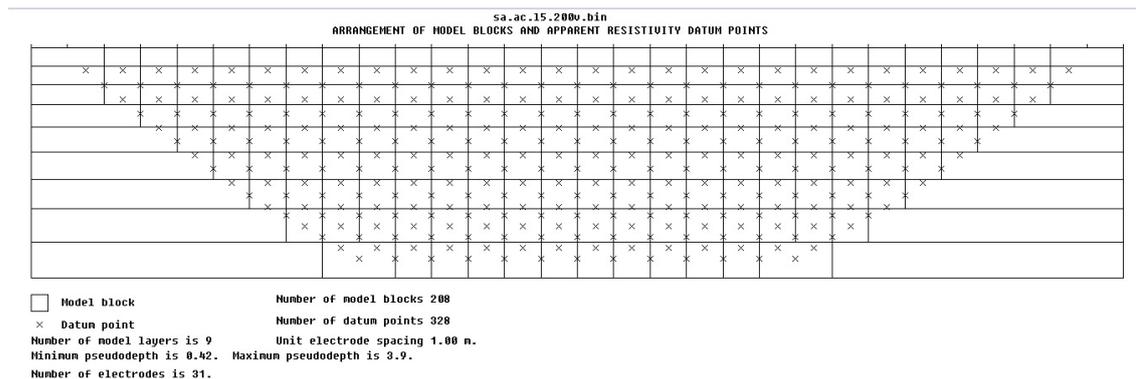


Figura 2.6: Figura ilustrativa do modelo de blocos utilizado

Os passos executados no programa Res2Dinv durante o processamento são citados abaixo juntamente com os efeitos e configurações:

1. *File* \mapsto *read data* (abre o dado bruto)
2. *Inversion* \mapsto *reduce effect of side blocks* (reduz o efeito dos blocos laterais)
3. *Inversion* \mapsto *select robust inversion* \implies As configurações utilizadas foram: *robust constrain* com fator de corte de 0,05 para o dado invertido e 0,005 para o modelo invertido. Nas 3 opções abaixo foram marcadas a opção *yes*.
4. *Inversion* \mapsto *Least-square inversion* \implies Comando que inicia a inversão dos dados.

CAPÍTULO 3

Discussões e Resultados

De modo a facilitar as discussões, visualização e entendimento, os resultados serão apresentados neste capítulo em seções, onde cada uma corresponderá a um dos rios estudados. Cada seção contará com duas subseções, cada uma correspondendo a uma das margens do rio.

Os números acima das hipérbolas nos radargramas do sistema RAMAC são as velocidades de propagação da onda eletromagnética no meio, que foram determinadas pelo ajuste de hipérbolas descrito na seção 2.3.1.

Vale ressaltar que todas as travessias aqui estudadas possuem quatro dutos enterrados.

3.1 Rio Real

3.1.1 Margem esquerda

Nesta margem foram utilizados o RAMAC de 200 MHz e o VIY 2 de 125 MHz e 300 MHz. A figura 3.1 mostra os resultados do RAMAC de 200 MHz, o radargrama da seção 1 não apresenta hipérbole alguma, os das seções 2 e 3 já apresentam uma hipérbole e os das seções 4 e 5 duas hipérbolas. Na figura 3.2 é possível visualizar os radargramas do VIY 2 de 125 MHz, onde é possível observar uma hipérbole nos radargramas das seções 1 e 2 e duas hipérbolas nos radargramas das seções 3, 4 e 5. A Esse aumento na quantidade de hipérbolas, ou seja, aumento na capacidade de imageamento da subsuperfície pelo GPR, se deve ao fato de que à medida que se afasta do rio tende a diminuir a saturação de água no solo e com isso reduz-se a atenuação do sinal do radar, melhorando por consequência a qualidade do dado.

O VIY 2 de 300 MHz (maior frequência utilizada nesta margem) sofreu uma maior atenuação do pulso, como já era esperado. Os radargramas estão na figura 3.3, onde não se observa hipérbole no radargrama da seção 1, pode-se observar uma hipérbole, não muito bem definida, nas seções 2 e 3; duas hipérbolas, não muito bem definidas, na seção 4 e uma hipérbole bem definida e outra não muito bem definida na seção 5.

Um fato importante a se observar nos radargramas das seções 2, 3 e 4 da figura 3.1 é

que o duto mais à direita, vai se tornando cada vez mais próximo da superfície, passando de 1,40 m de profundidade na seção 2 para cerca de 0,6 m na seção 3 e apenas 0,4 m na seção 4, porém já volta a se apresentar a 1,40 m na seção 5. Este fato deve ser observado pela área responsável da TRANSPETRO a fim de se verificar a necessidade de qualquer tipo de intervenção na área.

Outra questão a ser destacada é sobre as velocidades estimadas do meio. É possível observar que elas sofrem influência do grau de compactação do solo, ou seja, solos menos compactados possuem poros maiores e a maior quantidade de ar presente nestes poros faz com que a velocidade de propagação da onda eletromagnética seja maior. As velocidades de 0,2 m/ns encontrada na seção 2 e de 0,16 m/ns na seção 3 são muito superiores às demais velocidades estimadas em todos os outros radargramas aqui apresentados, justamente pelo fato descrito no início deste parágrafo.

Apesar do VIY 2 ser um sistema ainda em desenvolvimento, é possível perceber que a antena de frequência 125 MHz foi capaz de apresentar resultados onde o RAMAC falhou. Entretanto, na versão utilizada deste sistema a velocidade do meio é colocada *a priori* (no momento da aquisição) e obtém-se as seções já em profundidade. Este procedimento não nos permite realizar uma análise sobre a curvatura das hipérbolas difratadas nos tubos e assim dificulta seu emprego direto para determinar a verdadeira profundidade da geratriz superior dos tubos.

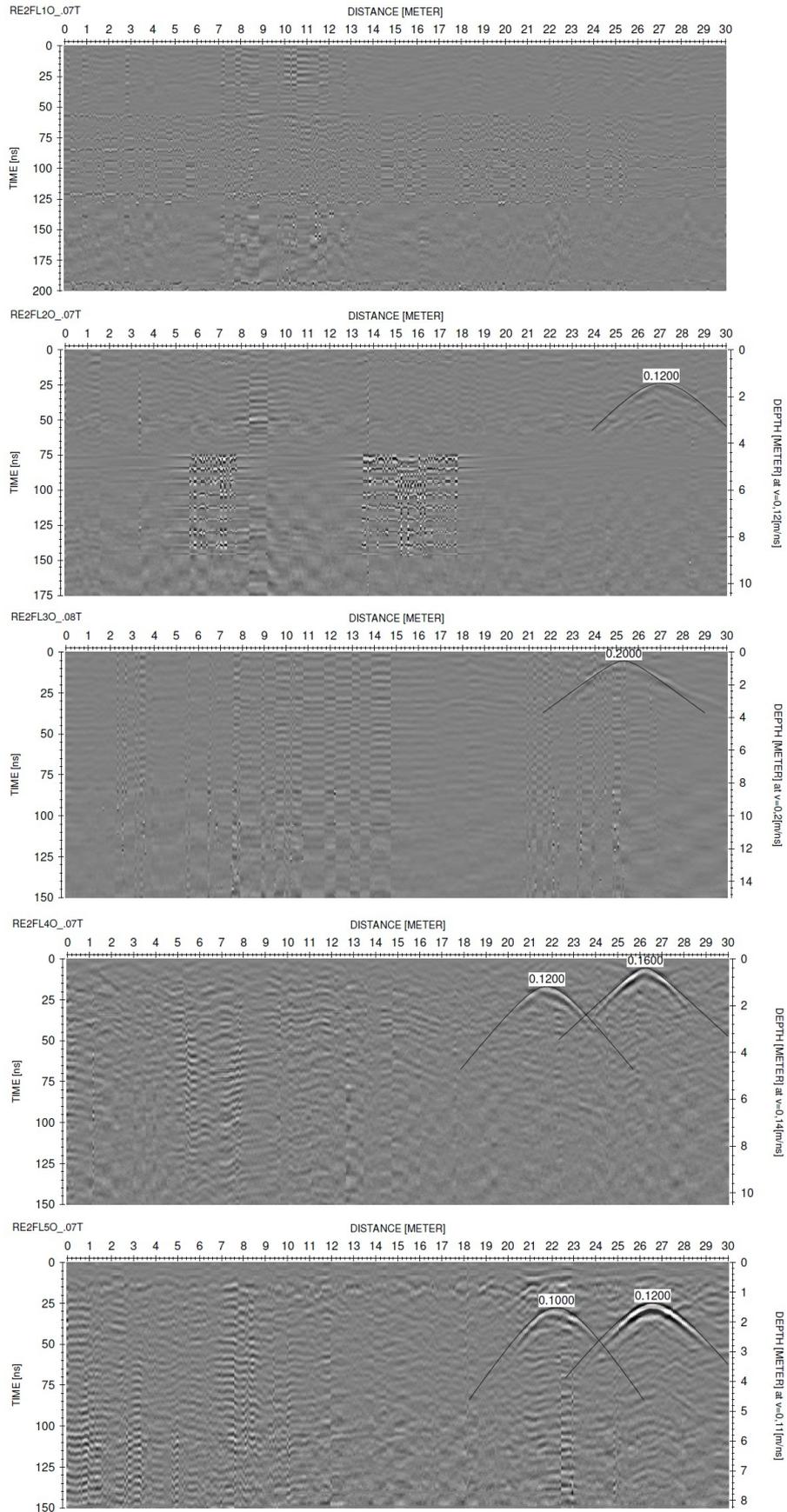


Figura 3.1: Radargramas do Rio Real, margem esquerda, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

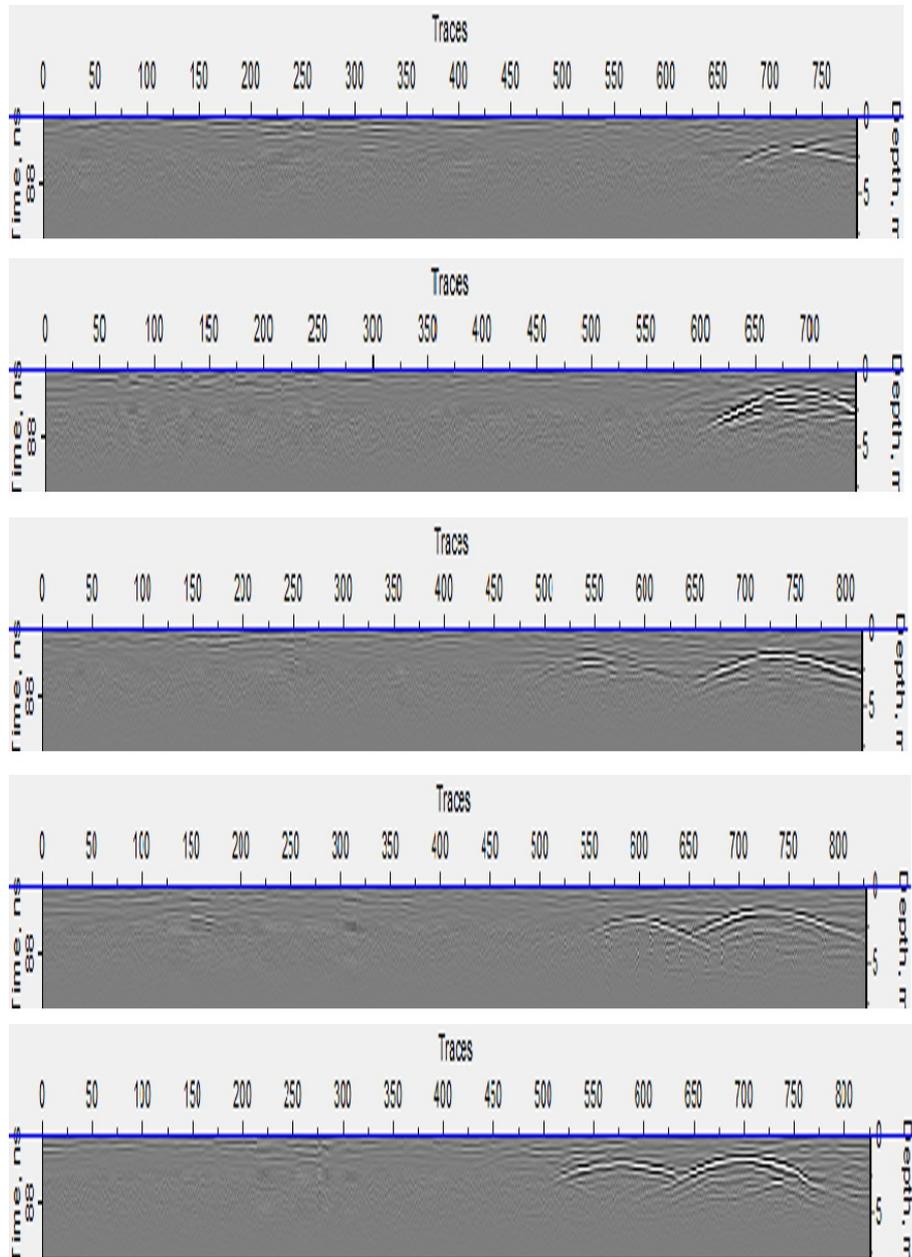


Figura 3.2: Radargramas do Rio Real, margem esquerda, antena VIY 2 de 125 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

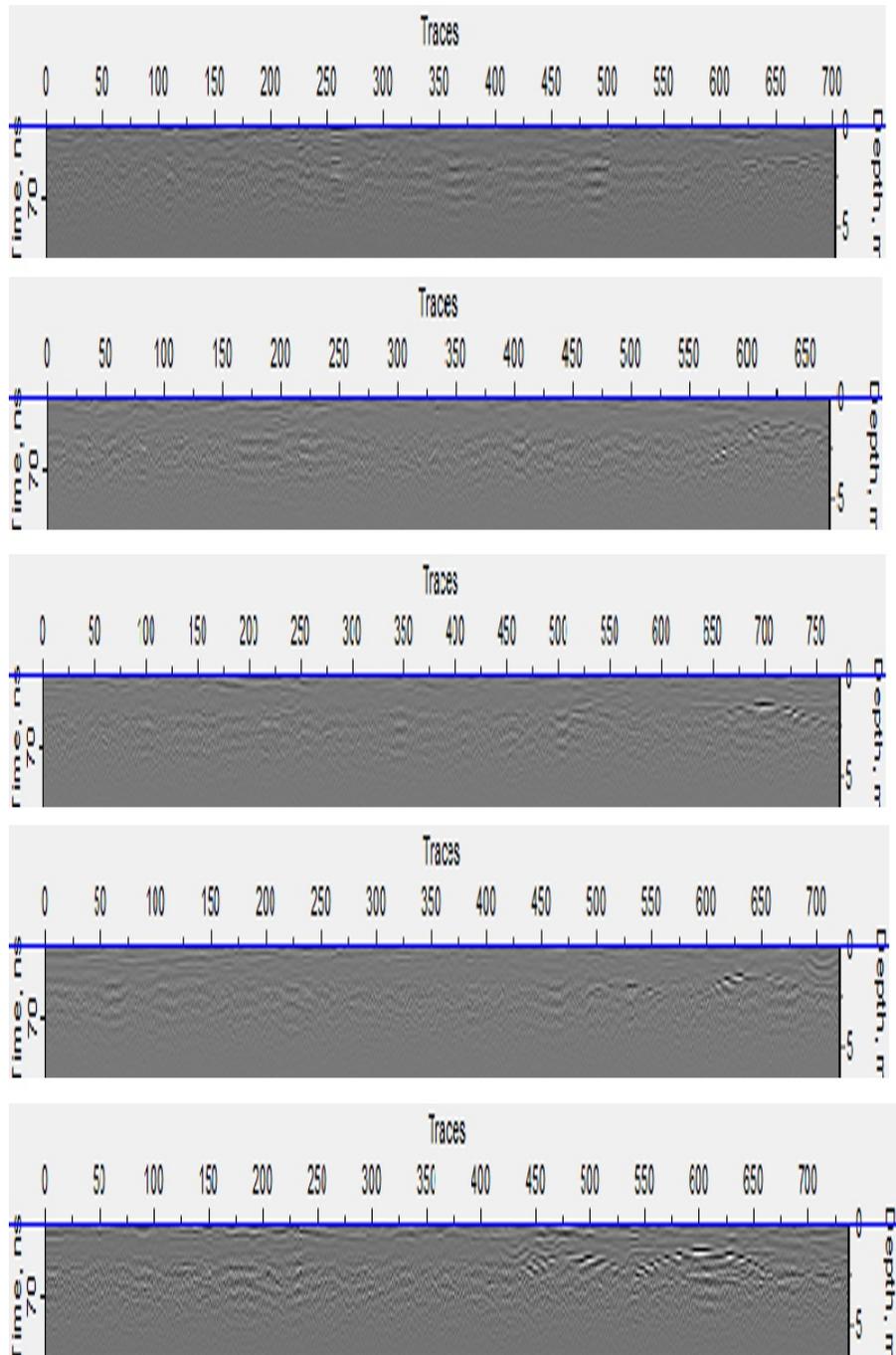


Figura 3.3: Radargramas do Rio Real, margem esquerda, antena VIY 2 de 300 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

3.1.2 Margem direita

Nesta margem foram utilizadas as três frequências do RAMAC e as duas do VIY 2. Como pode ser visto nas figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7, os radargramas das seções 1 e 2 não apresentam hipérbole alguma, os da seção 3 já apresentam uma hipérbole, os da seção 4 duas hipérbolas e os da seção 5 apresentam 3 hipérbolas (RAMAC de 100 MHz) e 4 hipérbolas (VIY 2 de 125 MHz e RAMAC de 200 MHz e 400 MHz). A figura 3.8 mostra que nesta margem a antena de VIY 2 de 300 MHz teve um desempenho inferior às demais, só apresentando quatro hipérbolas no radargrama da seção 5, não sendo possível a visualização de hipérbolas nos radargramas das demais seções. Esse aumento na quantidade de hipérbolas à medida que se afasta do leito do rio, ou seja, aumento na capacidade de imageamento da subsuperfície pelo GPR, se deve pelo fato de que à medida em que se afasta do rio tende a diminuir a saturação de água no solo e com isso reduz-se a atenuação do sinal do radar, melhorando por consequência a qualidade do dado.

É possível notar que a velocidade estimada nos radargramas ficou em torno de 0,12 m/ns. Os radargramas mostram que o duto mais raso está enterrado a 1,20 m enquanto que o mais profundo se encontra a 3,20 m de profundidade. Para os que aparecem em duas ou três seções é possível notar um aumento de suas profundidades à medida que se aproximam do rio.

Na figura 3.9 é possível notar uma excelente correlação de posicionamento horizontal (posição no eixo x) dos dutos para as 3 frequências utilizadas, porém as profundidades encontradas no radargrama da antena RAMAC de 100 MHz são ligeiramente menores (entre 10 a 20 cm) que as encontradas nos radargramas das antenas RAMAC de 200 MHz e 400 MHz. Isto ocorreu, muito provavelmente por um erro interpretativo na hora em que foi feito o ajuste de hipérbolas para se determinar a velocidade do meio.

Nesta margem do rio Real o desempenho dos sistemas RAMAC (100 MHz, 200 MHz e 400 MHz) e VIY 2 (125 MHz) foi similar, enquanto que o VIY 2 (300 MHz) teve desempenho muito inferior às demais antenas. Entretanto, na versão utilizada do VIY 2, a velocidade do meio é colocada *a priori* (no momento da aquisição) e obtém-se as seções já em profundidade. Este procedimento não nos permite realizar uma análise sobre a curvatura das hipérbolas difratadas nos tubos e assim dificulta seu emprego direto para determinar a verdadeira profundidade da geratriz superior dos tubos.

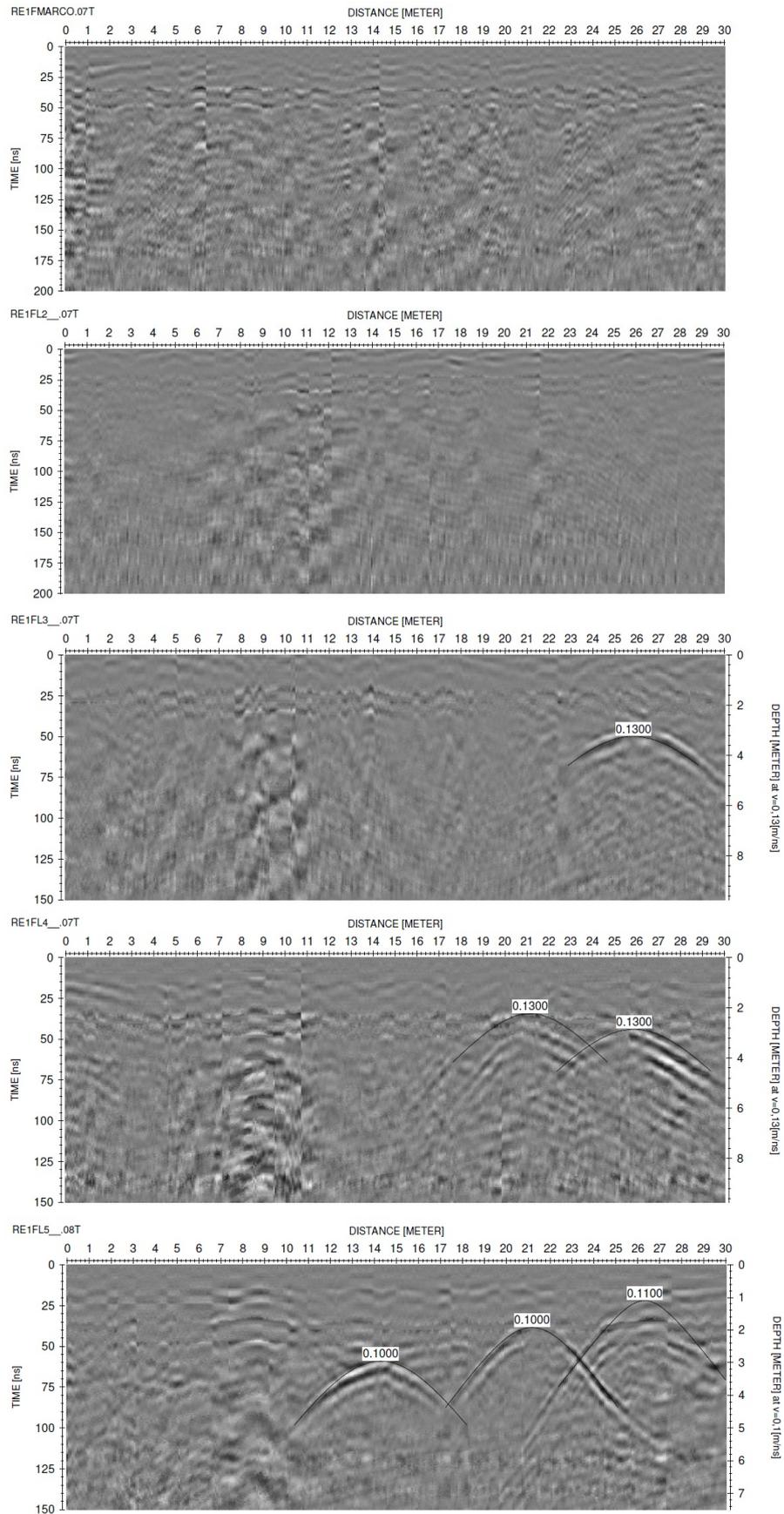


Figura 3.4: Radargramas do Rio Real, margem direita, antena RAMAC de 100 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

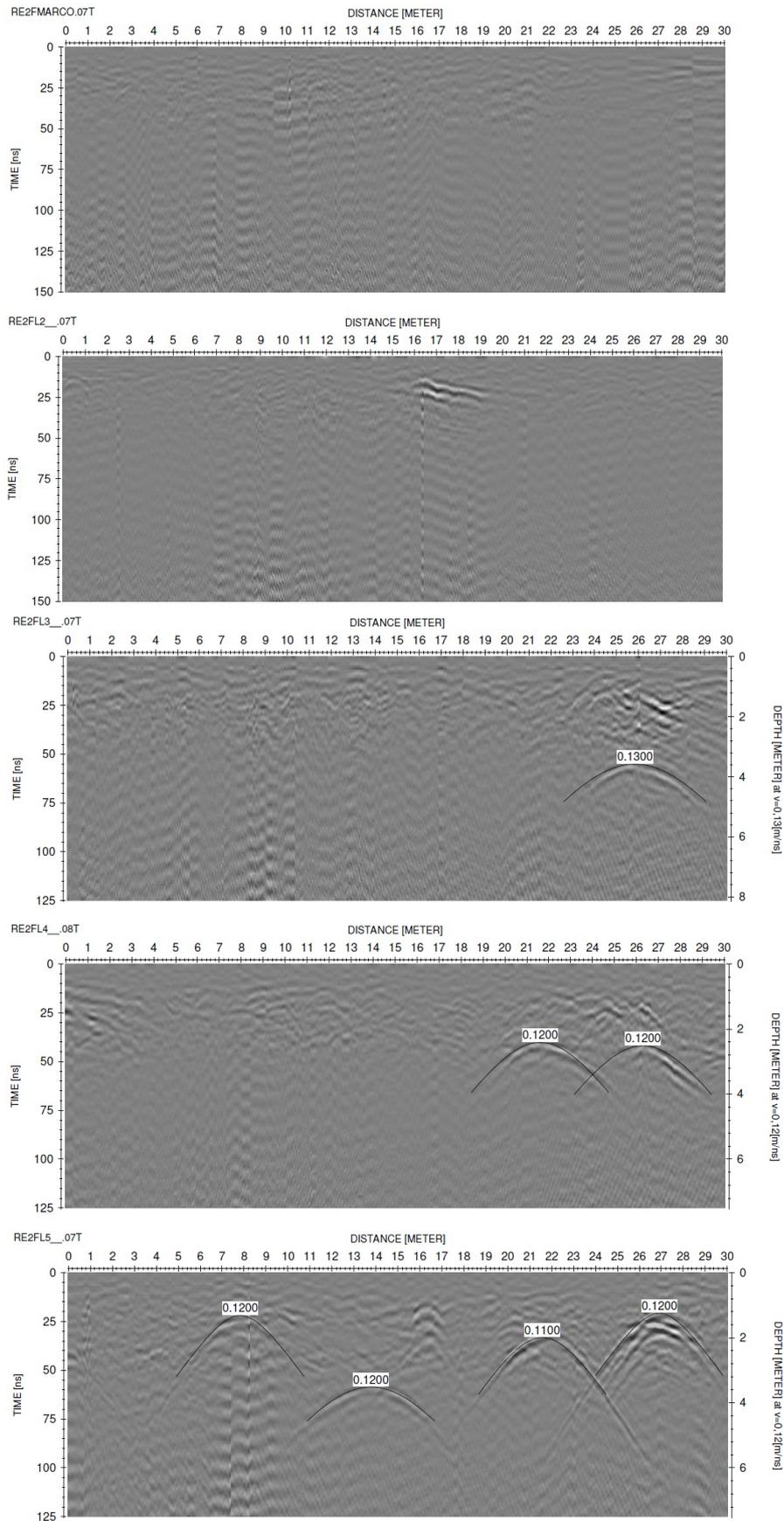


Figura 3.5: Radargramas do Rio Real, margem direita, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

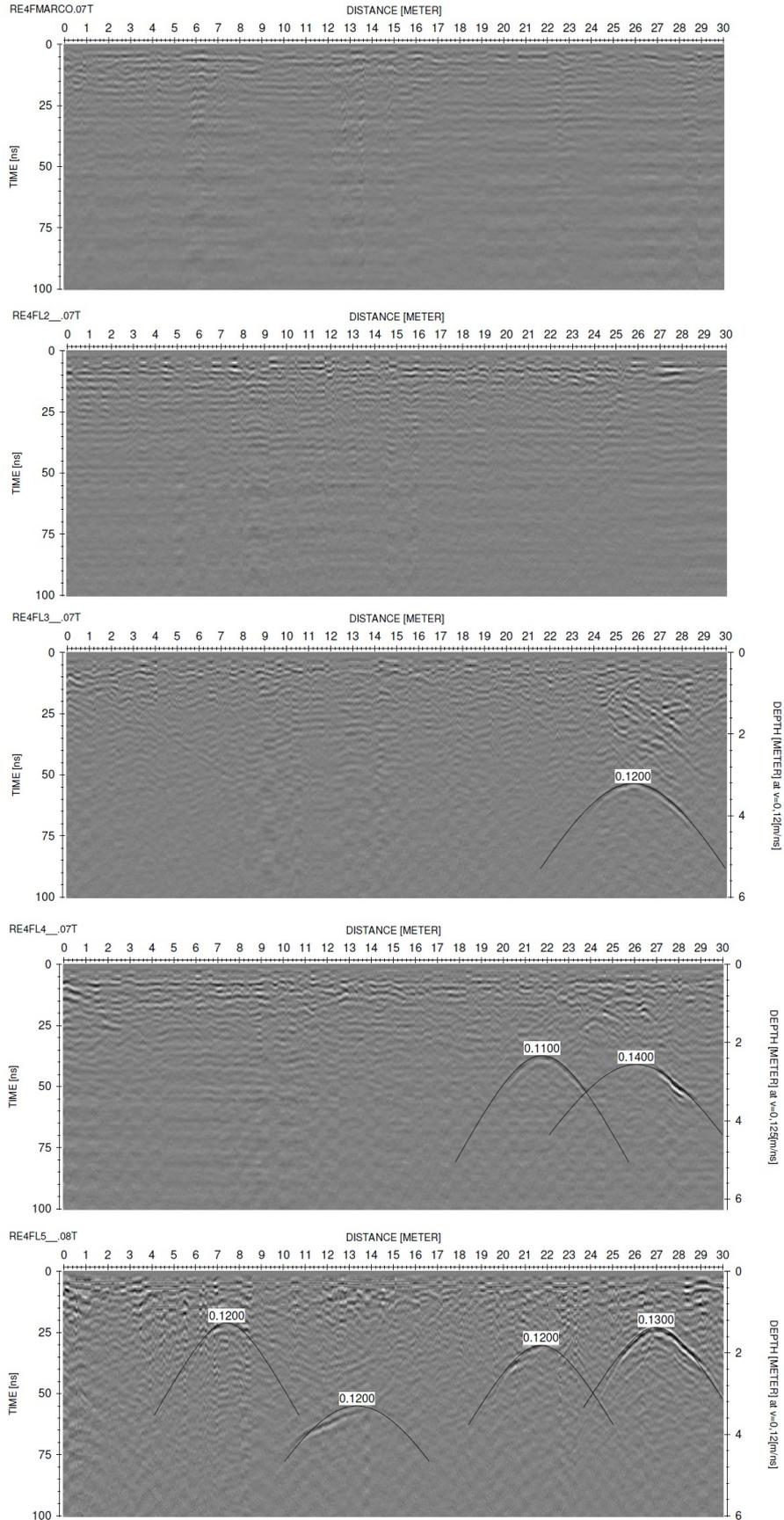


Figura 3.6: Radargramas do Rio Real, margem direita, antena RAMAC de 400 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

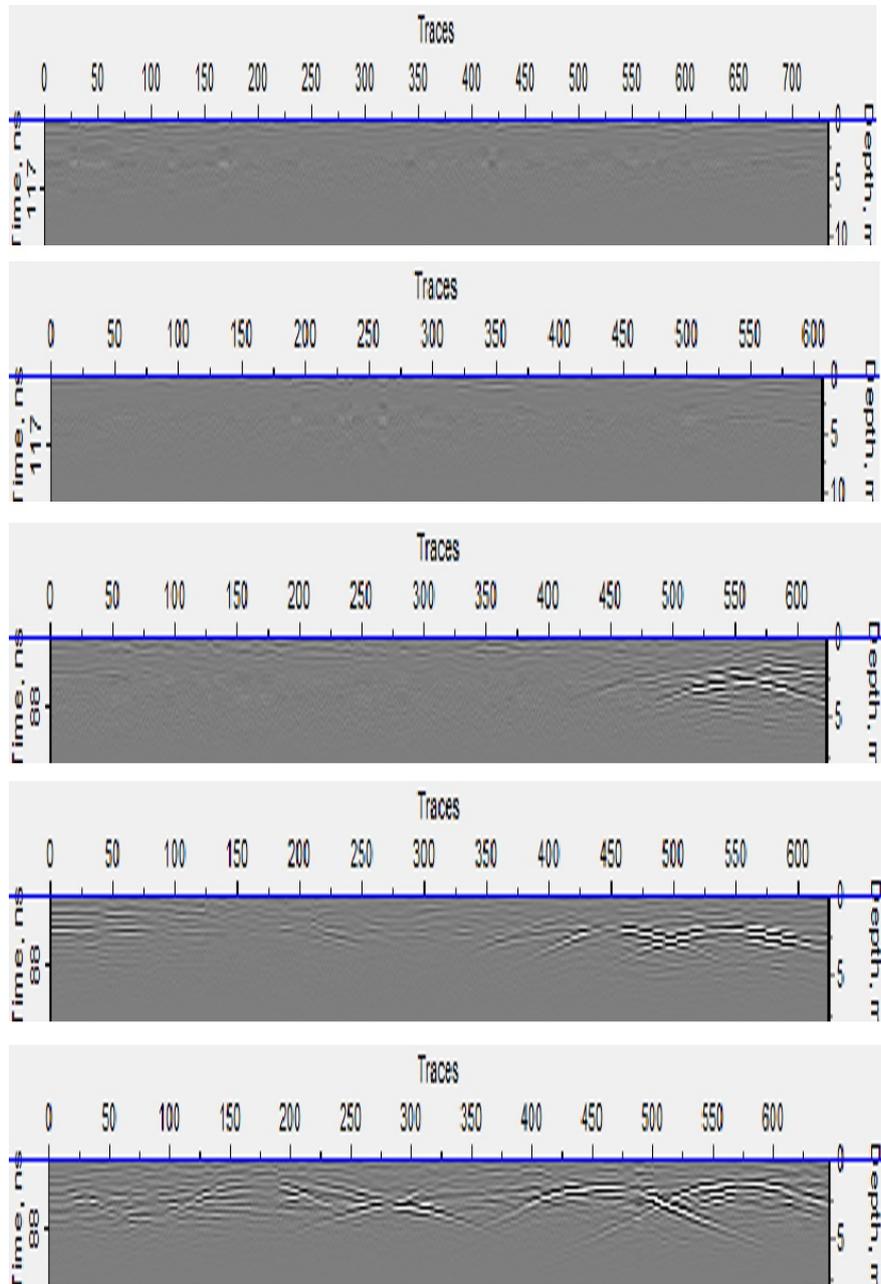


Figura 3.7: Radargramas do Rio Real, margem direita, antena VIY 2 de 125 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

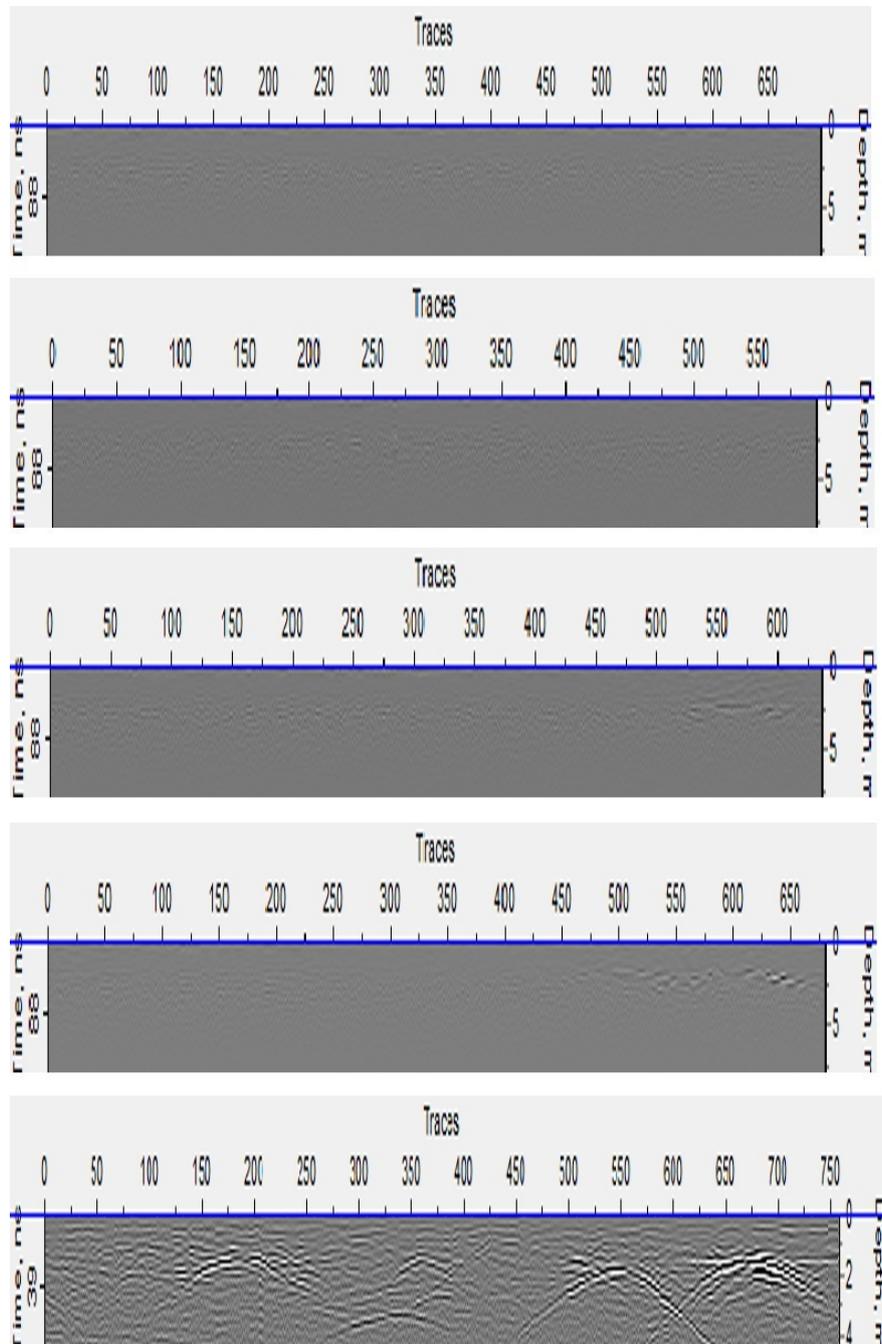


Figura 3.8: Radargramas do Rio Real, margem direita, antena VIY 2 de 300 MHz.
Seção 1 acima e 5 abaixo.

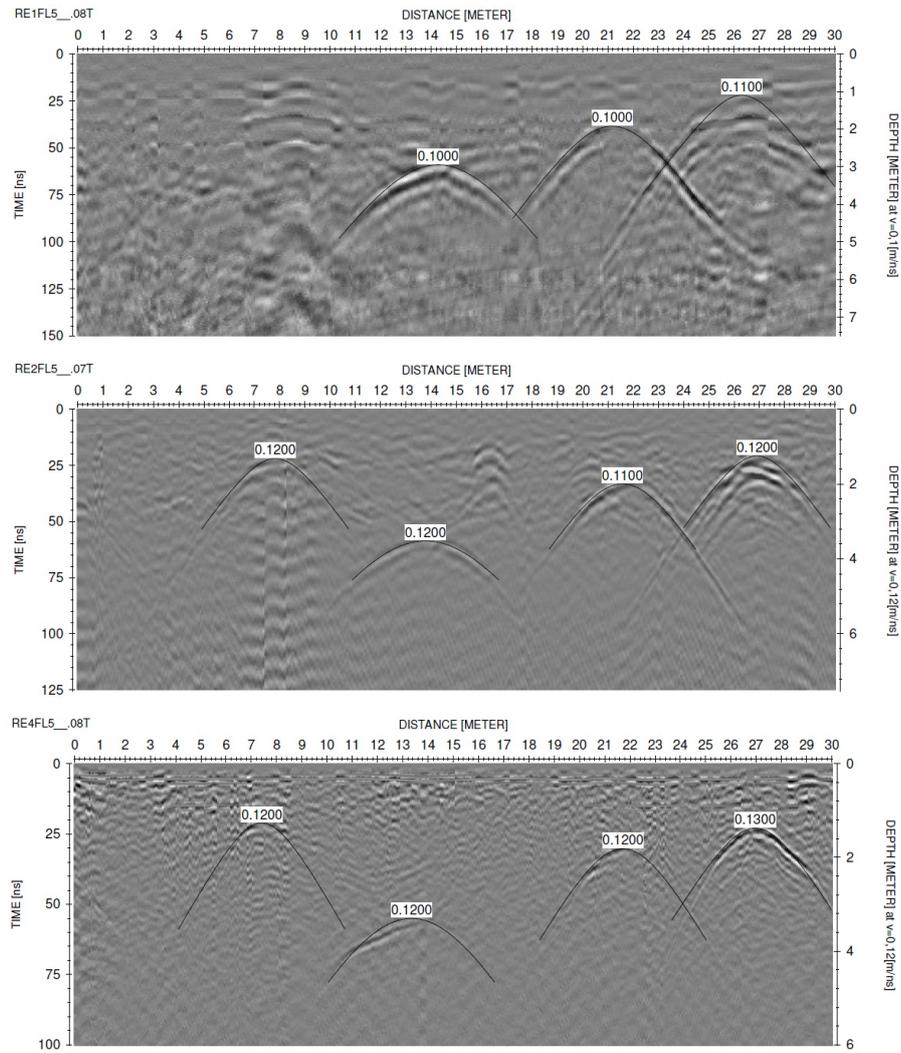


Figura 3.9: Radargramas do Rio Real, margem direita, Seção 5, RAMAC, 100 MHz acima, 200 MHz no meio e 400 MHz abaixo.

3.2 Rio Sauípe

3.2.1 Margem esquerda

Nesta margem foram utilizadas as frequências de 100 MHz e 200 MHz do RAMAC, 125 MHz e 300 MHz do VIY 2, além de terem sido adquiridos os perfis eletrorresistivos com o Syscal Pro Switch 72. As seções tiveram tamanho menor que 30 m, devido ao fato de nesta margem existir uma vegetação densa no início das seções e uma região alagada no final das seções.

Como pode ser visto na figura 3.10 não é possível extrair qualquer informação dos radargramas da antena RAMAC de 100 MHz, pois o solo argiloso saturado da região atenua a onda emitida pelo GPR, como já era esperado. Como mostra a figura 3.11 a antena RAMAC de 200 MHz teve um resultado melhor que a de 100 MHz, pois nos radargramas das seções 1 e 2 é possível visualizar uma única hipérbole entre as distâncias de 19 e 20 m, a uma profundidade estimada de 0,8 m. Como a hipérbole está presente em duas seções consecutivas em distâncias e profundidades próximas é bem provável se tratar de um duto. A visualização deste duto pela antena de 200 MHz só foi possível devido à existência de uma pequena zona arenosa pouco espessa (cerca de 80 cm), que se situa no final das seções, aliado ao fato do duto se encontrar bem próximo da superfície. Não houve melhoramento dos dados fornecidos pelo GPR ao se afastar do rio, pois devido à presença da zona alagada o solo argiloso se mantém com uma alta saturação em todas as seções investigadas.

As figuras 3.12 e 3.13 mostram que a qualidade dos dados do sistema VIY 2 é superior à qualidade dos dados do sistema RAMAC, pois nos radargramas destas figuras é possível visualizar uma hipérbole nas seções 1 e 2 em ambas as frequências, uma hipérbole nas seções 3 e 5 para a frequência de 125 MHz e 2 hipérbolas mal definidas na seção 4 da frequência de 125 MHz.

A figura 3.14 mostra a resistividade aparente medida nas seções de 1 a 5, enquanto que a figura 3.15 mostra a resistividade aparente calculada para o modelo após a inversão. Como era esperado a resistividade elétrica aparente, calculada e medida, mostra que a área investigada em todas as seções tem em sua maior parte resistividades inferiores a 90 ohm.m chegando a ter valores inferiores a 20 ohm.m em determinados pontos. Esta baixíssima resistividade medida justifica perfeitamente o mau desempenho do GPR nesta área meio pantanosa. É possível, ainda, notar a zona arenosa presente na parte final das seções devido à alta resistividade medida nesta área. Foi justamente através destes perfis elétricos que foi possível estimar a espessura da camada arenosa e perceber que ela se estende por todas as cinco seções. Logo abaixo desta camada existe uma zona bem condutiva o que justifica a má qualidade dos dados do GPR. Seguindo este raciocínio, o não aparecimento da hipérbole nas seções 3, 4 e 5 da figura 3.11 é um indicativo de que o duto mapeado nas seções 1 e 2 da mesma figura se aprofunda e penetra na zona condutiva (abaixo de 80 cm de profundidade).

Como pode ser visto nas figuras 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13 o desempenho do sistema VIY 2 de 125 MHz foi superior ao do sistema RAMAC de 100 MHz e 200 MHz, pois nos radargramas do VIY 2 de 125 MHz é possível visualizar um número maior de hipérboles. Entretanto, na versão utilizada do VIY 2, a velocidade do meio é colocada *a priori* (no momento da aquisição) e obtém-se as seções já em profundidade. Este procedimento não nos permite realizar uma análise sobre a curvatura das hipérboles difratadas nos tubos e assim dificulta seu emprego direto para determinar a verdadeira profundidade da geratriz superior dos tubos.

Os pontos anômalos de alta e baixa resistividade podem ser notados de forma esférica/ovalada nos perfis mostrados na figura 3.15. Apesar disso não é possível afirmar que esta seja a resposta de dutos metálicos ao método eletrorresistivo, pois os dados do RAMAC não possuem boa qualidade e os dados do VIY 2 estão com a escala horizontal em números de traços, enquanto o perfil de eletrorresistividade está em distância, e a vertical não indica a verdadeira profundidade dos dutos (fato explicado no parágrafo anterior), não sendo possível, portanto, comparar a localização destas anomalias de alta e baixa resistividade com a localização das hipérboles nos radargramas. Mesmo assim sugere-se o uso do método eletrorresistivo em outras travessias de modo a gerar uma maior quantidade de dados que possam ser comparados com os resultados de outros métodos geofísicos.

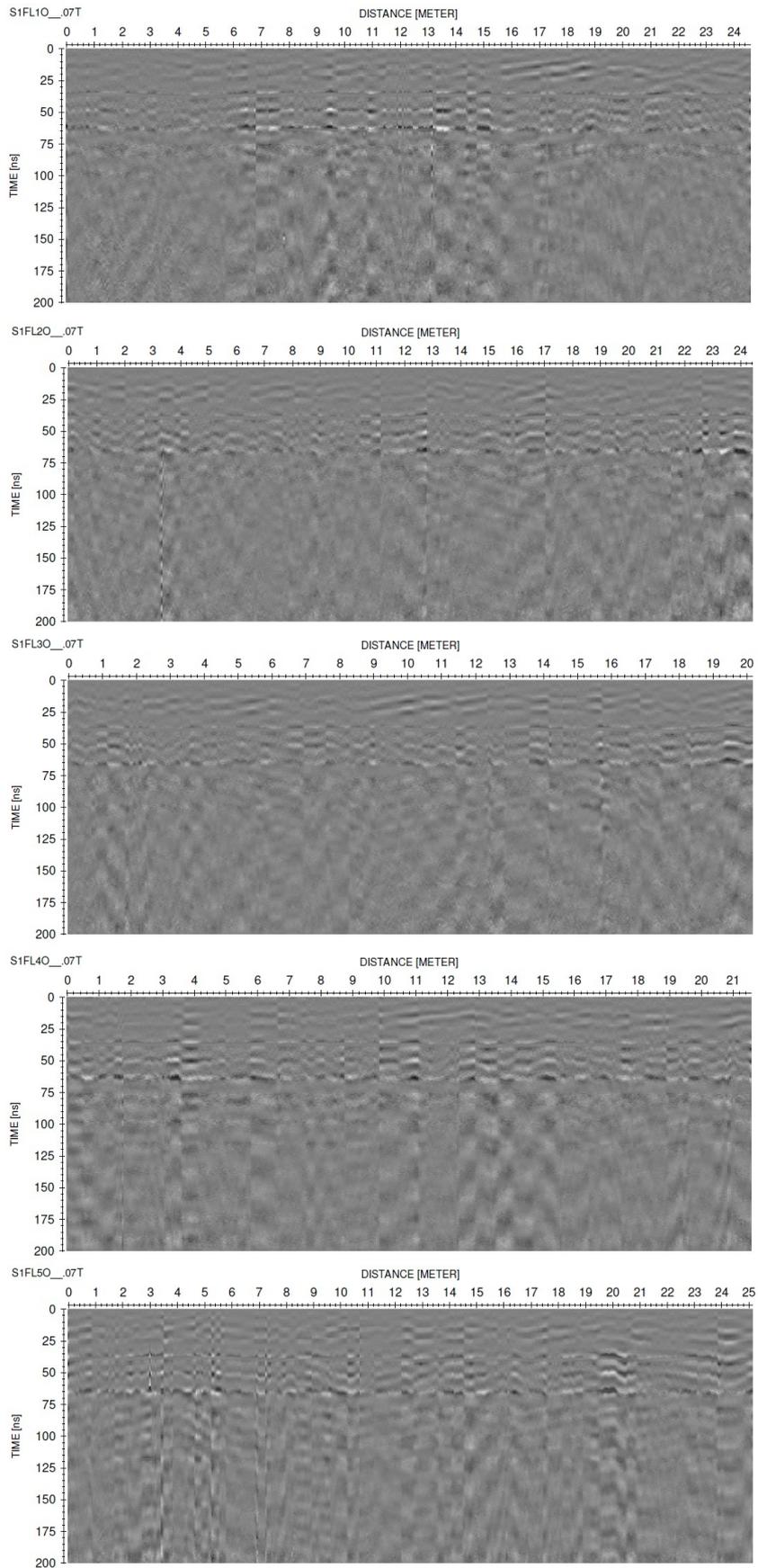


Figura 3.10: Radargramas do Rio Sauípe, margem esquerda, antena RAMAC de 100 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

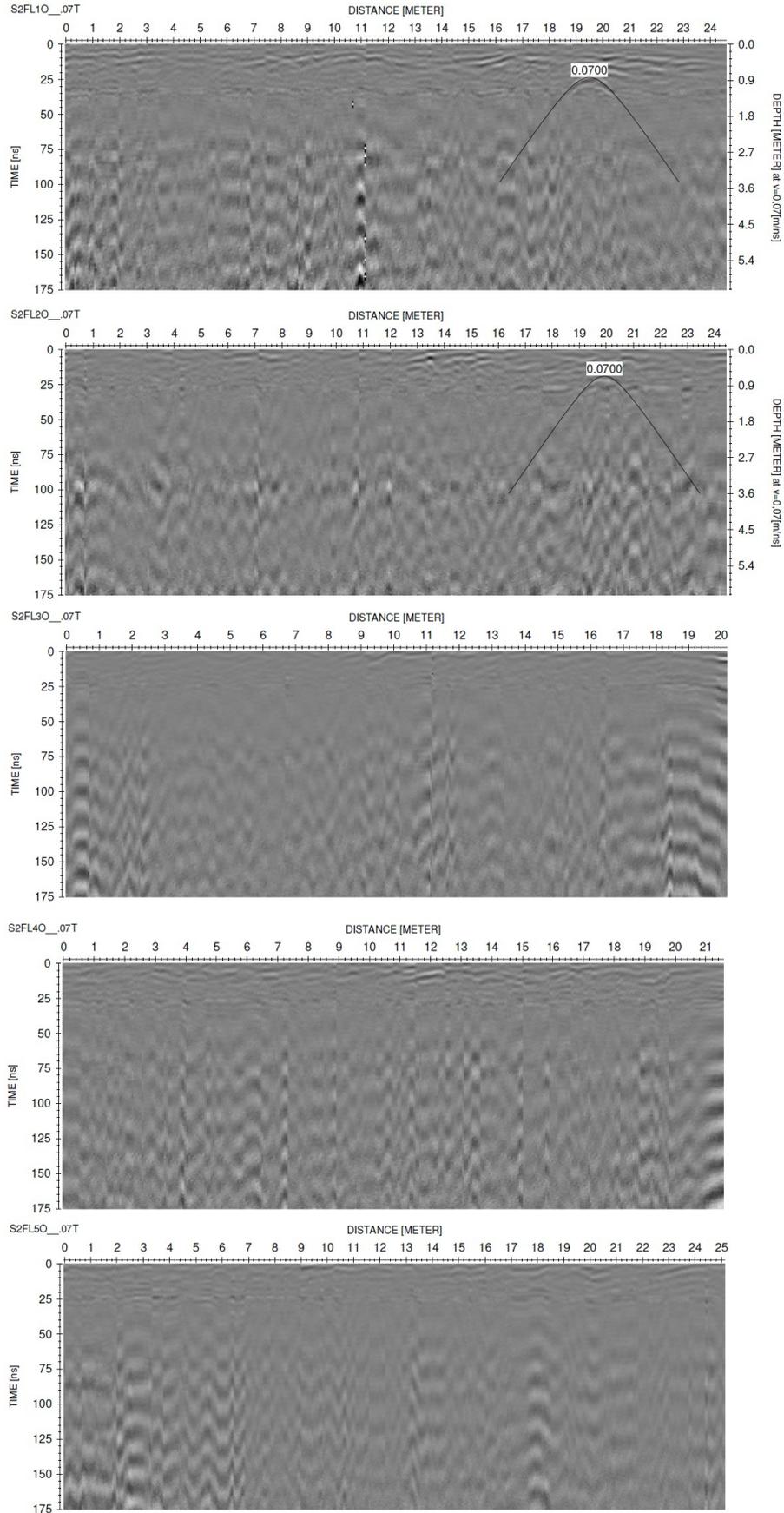


Figura 3.11: Radargramas do Rio Sauípe, margem esquerda, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

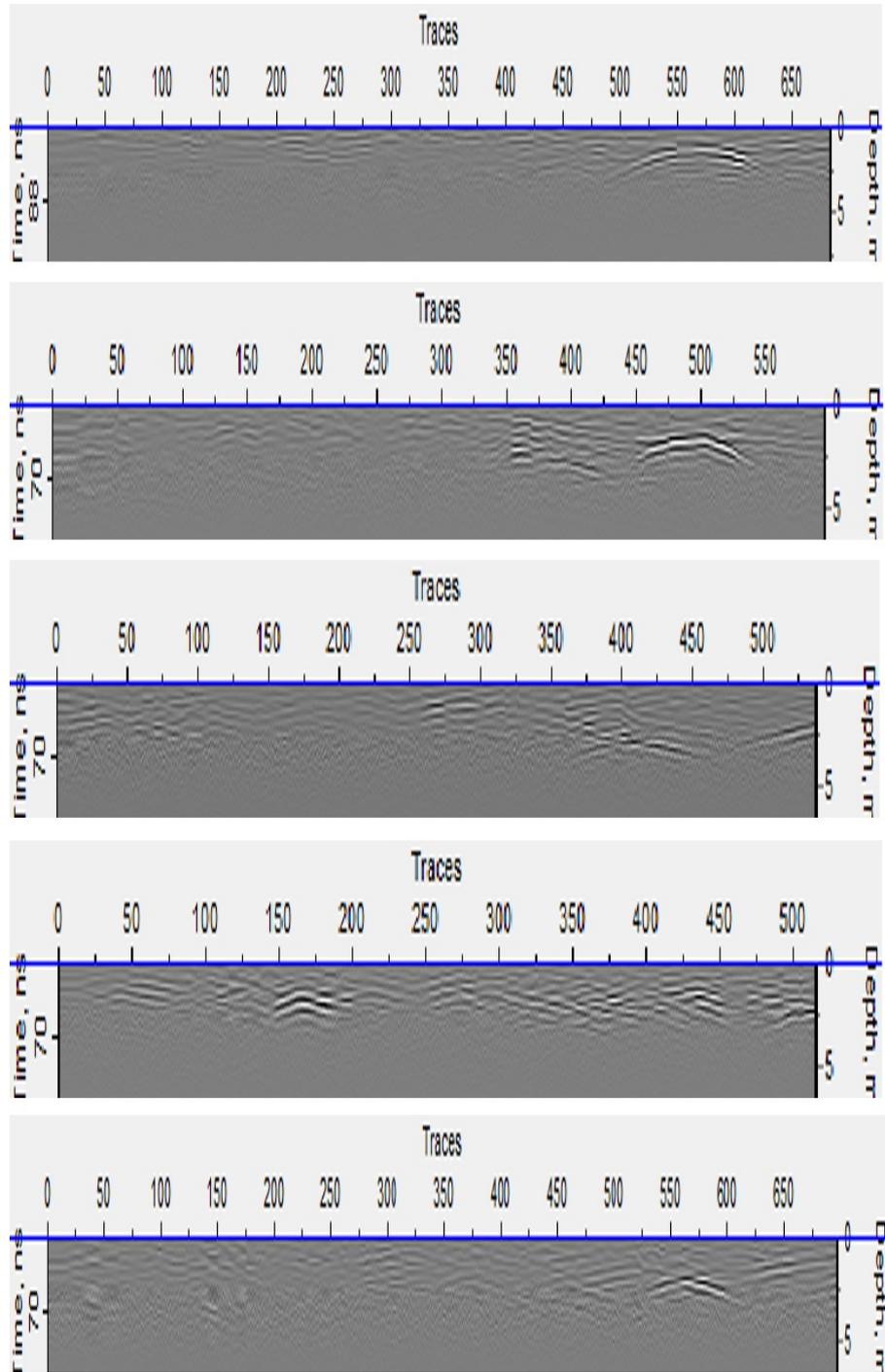


Figura 3.12: Radargramas do Rio Sauípe, margem esquerda, antena VIY 2 de 125 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

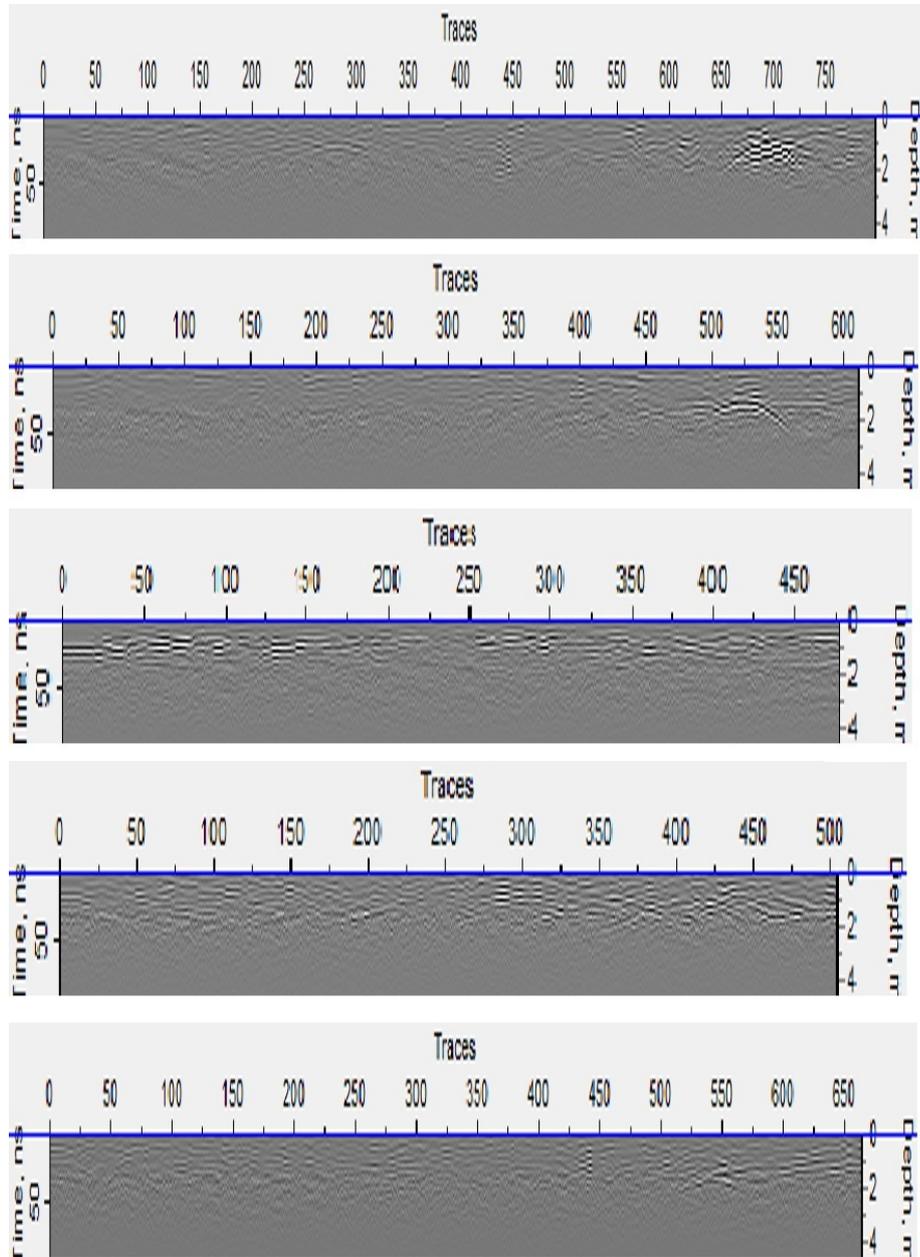


Figura 3.13: Radargramas do Rio Sauípe, margem esquerda, antena VIY 2 de 300 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

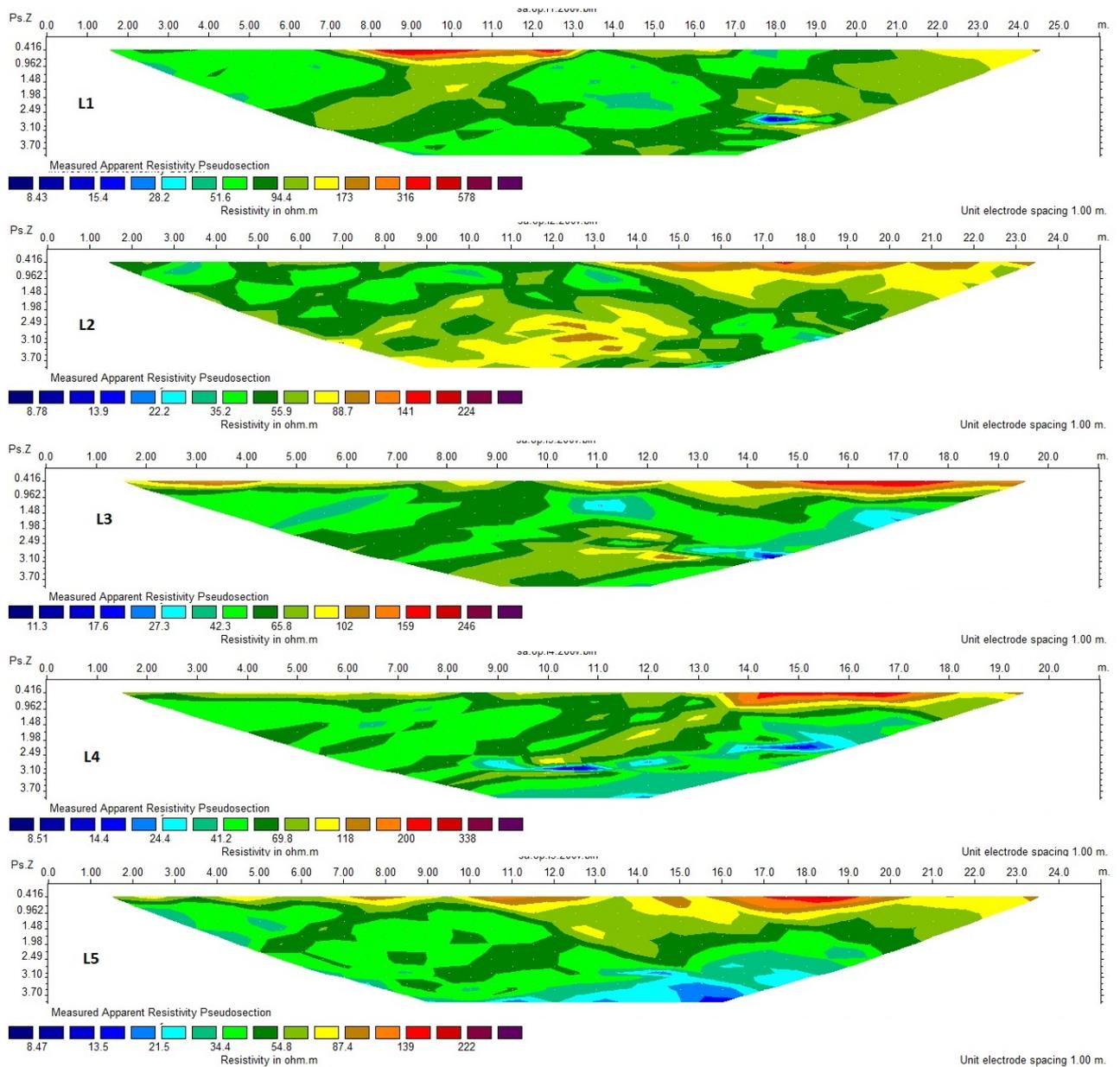


Figura 3.14: Perfis de resistividade aparente medida no Rio Sauípe, margem esquerda. Seção 1 acima e 5 abaixo.

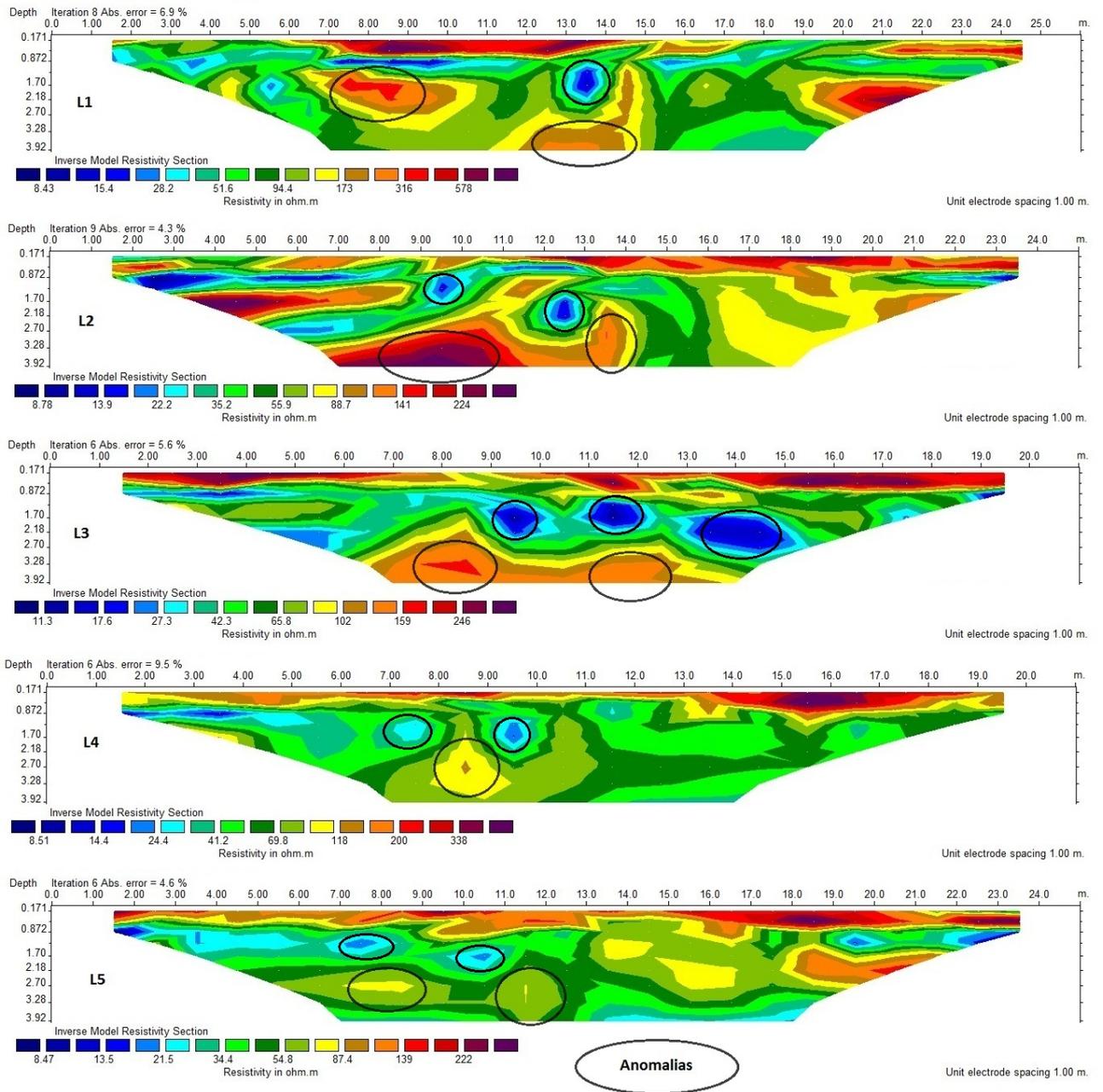


Figura 3.15: Perfis de resistividade aparente do modelo invertido do Rio Sauípe, margem esquerda. Seção 1 acima e 5 abaixo.

3.2.2 Margem direita

Nesta margem também foram utilizadas as frequências de 100 MHz e 200 MHz do RAMAC, 125 MHz e 300 MHz do VIY 2, além de terem sido adquiridos os perfis eletrorresistivos com o Syscal Pro Switch 72. Nesta margem não existiram empecilhos naturais e as seções tiveram o tamanho total da largura da faixa que é de 30 m.

Como pode ser visto nas figuras 3.16 e 3.17 não é possível extrair qualquer informação destes radargramas, pois o solo argiloso saturado da região atenuou por completo a onda emitida pelo RAMAC.

A figura 3.18 mostra que o VIY 2 125 MHz obteve um resultado melhor que o sistema RAMAC, pois é possível visualizar uma hipérbole na seção 1, duas hipérbolas na seção 2, duas hipérbolas bem definidas e uma mal definida na seção 3, três hipérbolas mal definidas na seção 4 e três hipérbolas bem definidas na seção 5. A figura 3.19 mostra que o VIY 2 300 MHz, mesmo tendo uma frequência superior às do RAMAC utilizadas nesta margem, e estando por isso, mais suscetível à atenuação do sinal, teve um desempenho superior, pois foi capaz de imagear um duto nas seções 2 e 3, o que comprova que o sistema VIY 2 foi capaz de fornecer resultados melhores. Entretanto, na versão utilizada do VIY 2, a velocidade do meio é colocada *a priori* (no momento da aquisição) e obtém-se as seções já em profundidade. Este procedimento não nos permite realizar uma análise sobre a curvatura das hipérbolas difratadas nos tubos e assim dificulta seu emprego direto para determinar a verdadeira profundidade da geratriz superior dos tubos.

A figura 3.20 mostra a resistividade aparente medida nas seções de 1 a 5, enquanto que a figura 3.21 mostra a resistividade aparente calculada para o modelo após a inversão. Como era esperado a resistividade elétrica aparente, calculada e medida, mostra que a área investigada em todas as seções tem em sua maior parte resistividades inferiores a 100 ohm.m chegando a ter valores inferiores a 20 ohm.m em determinados pontos. Esta baixíssima resistividade medida justifica perfeitamente o mau desempenho do GPR na área.

Nesta margem também é possível notar as zonas arenosas superficiais com cerca de 80 cm de espessura, devido à alta resistividade medida nesta área. À partir de 0,8 m de profundidade existe uma zona bem condutiva o que justifica a má qualidade dos dados do GPR. Pode-se concluir que todos os dutos da faixa, nesta margem do rio, estão a mais de 80 cm de profundidade, pois caso contrário apareceriam nos radargramas das figuras 3.16 e 3.17, já que o RAMAC só foi capaz de imagear até esta profundidade.

Nesta margem também existem pontos anômalos de alta e baixa resistividade que podem ser notados de forma esférica/ovalada nos perfis mostrados na figura 3.21. Apesar disso não é possível afirmar que esta seja a resposta de dutos ao método eletrorresistivo, pois os dados do RAMAC não possuem boa qualidade e os dados do VIY 2 estão com a escala

horizontal em números de traços, enquanto o perfil de eletrorresistividade está em distância, e a vertical não indica a verdadeira profundidade dos dutos (fato explicado anteriormente), não sendo possível, portanto, comparar a localização destas anomalias de alta e baixa resistividade com a localização das hipérboles nos radargramas. Mesmo assim sugere-se o uso do método eletrorresistivo em outras travessias de modo a gerar uma maior quantidade de dados que possam ser comparados com os resultados de outros métodos geofísicos.

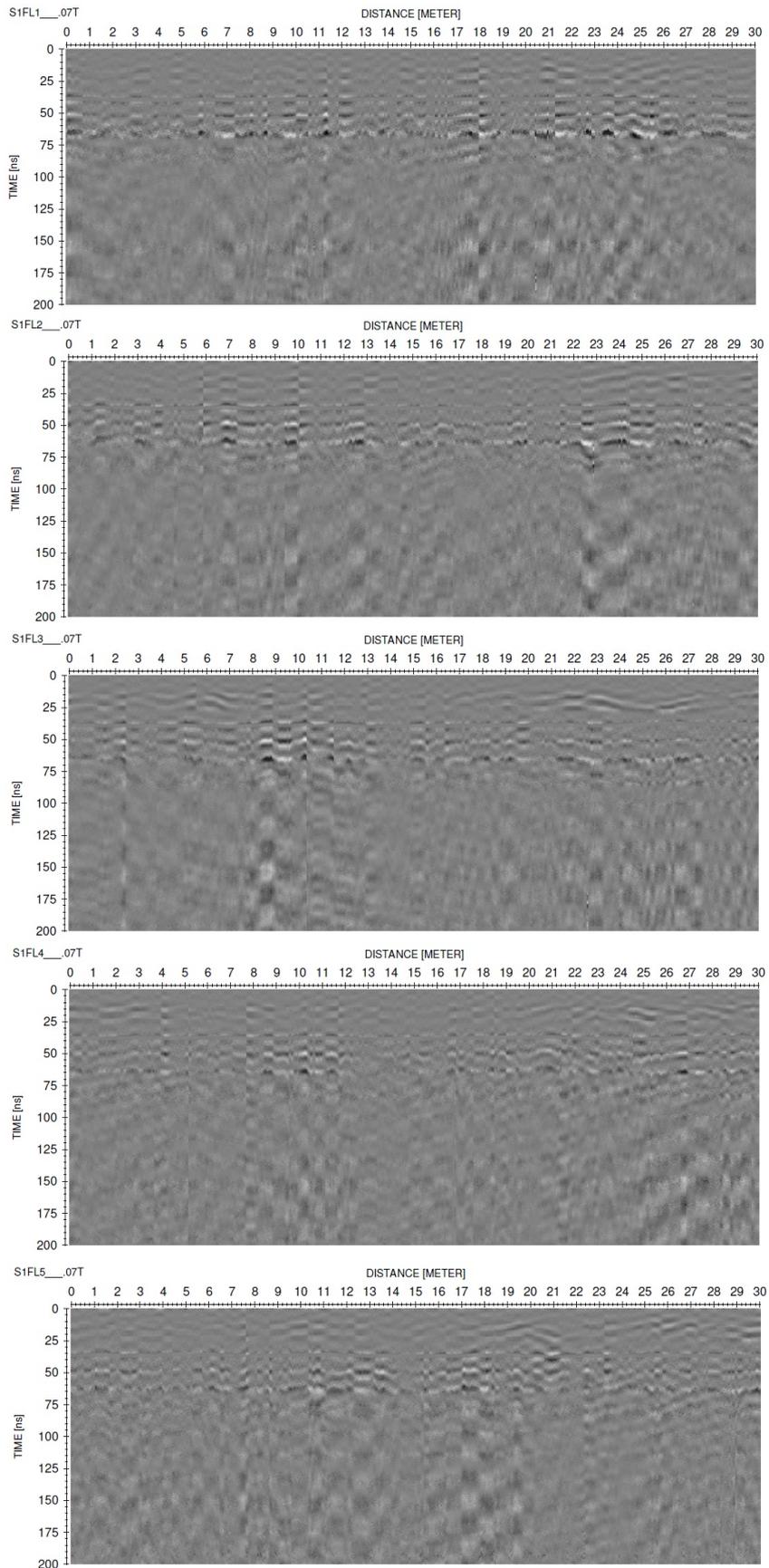


Figura 3.16: Radargramas do Rio Sauípe, margem direita, antena RAMAC de 100 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

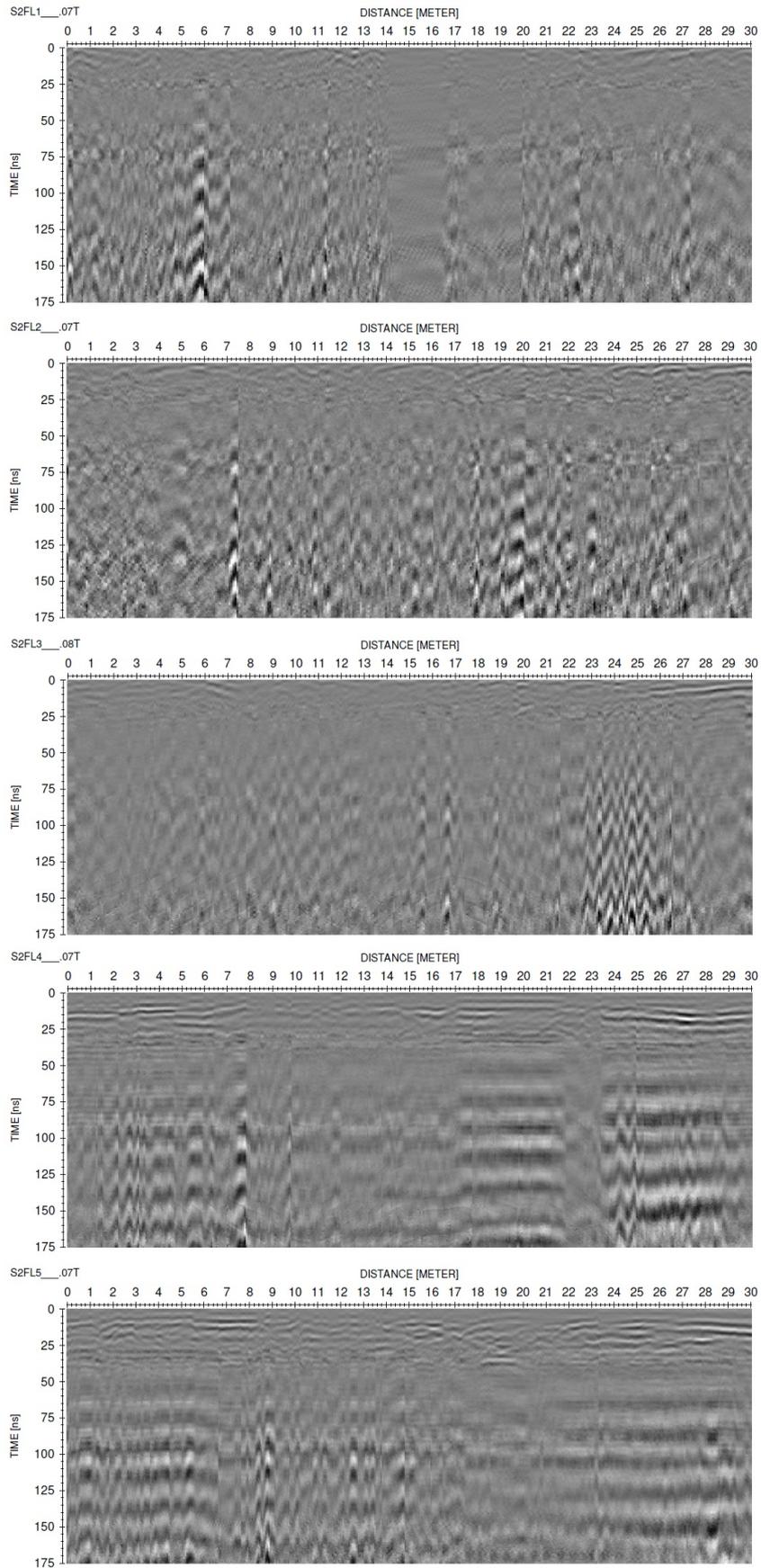


Figura 3.17: Radargramas do Rio Sauípe, margem direita, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

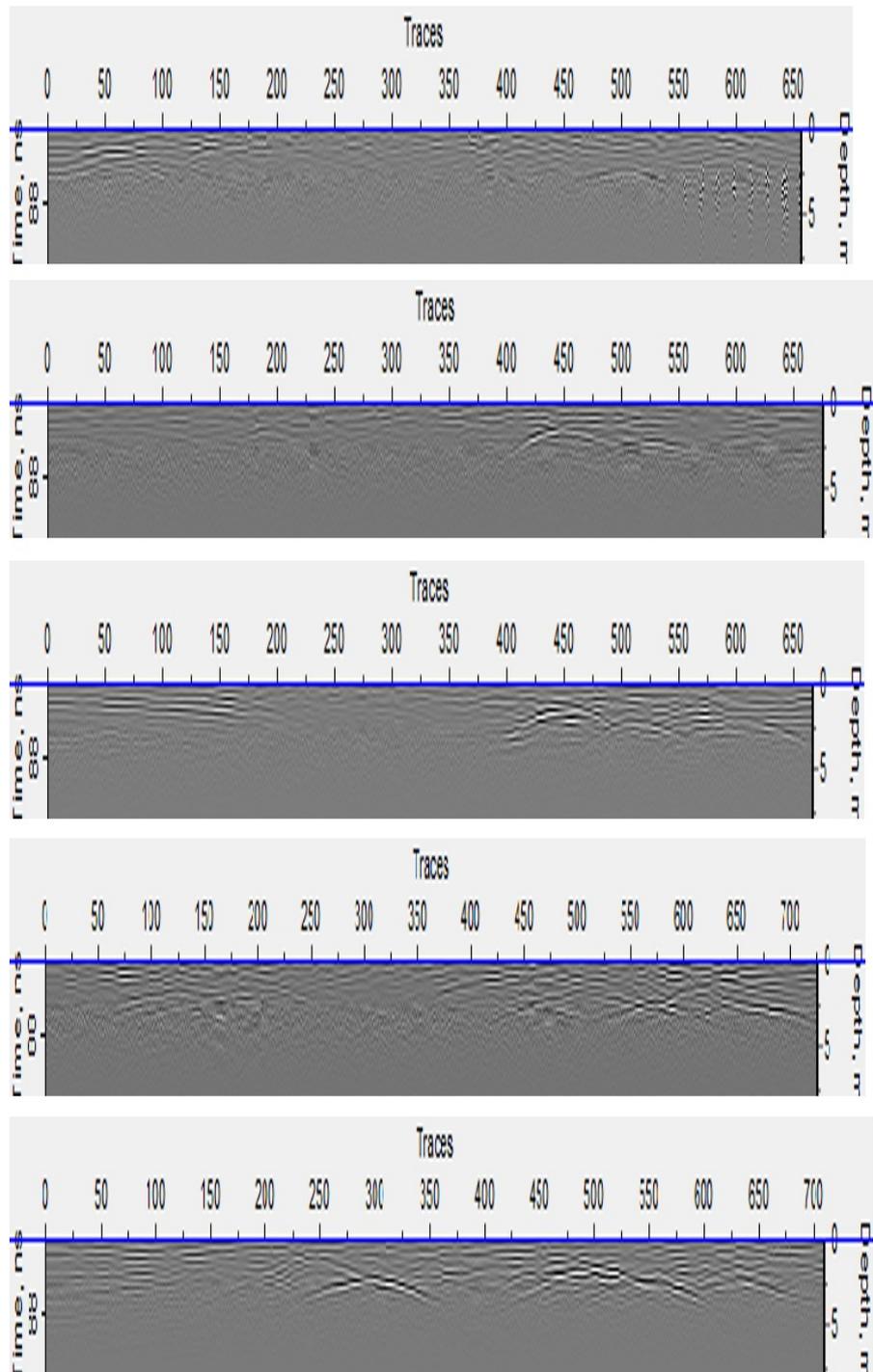


Figura 3.18: Radargramas do Rio Sauípe, margem direita, antena VIY 2 de 125 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

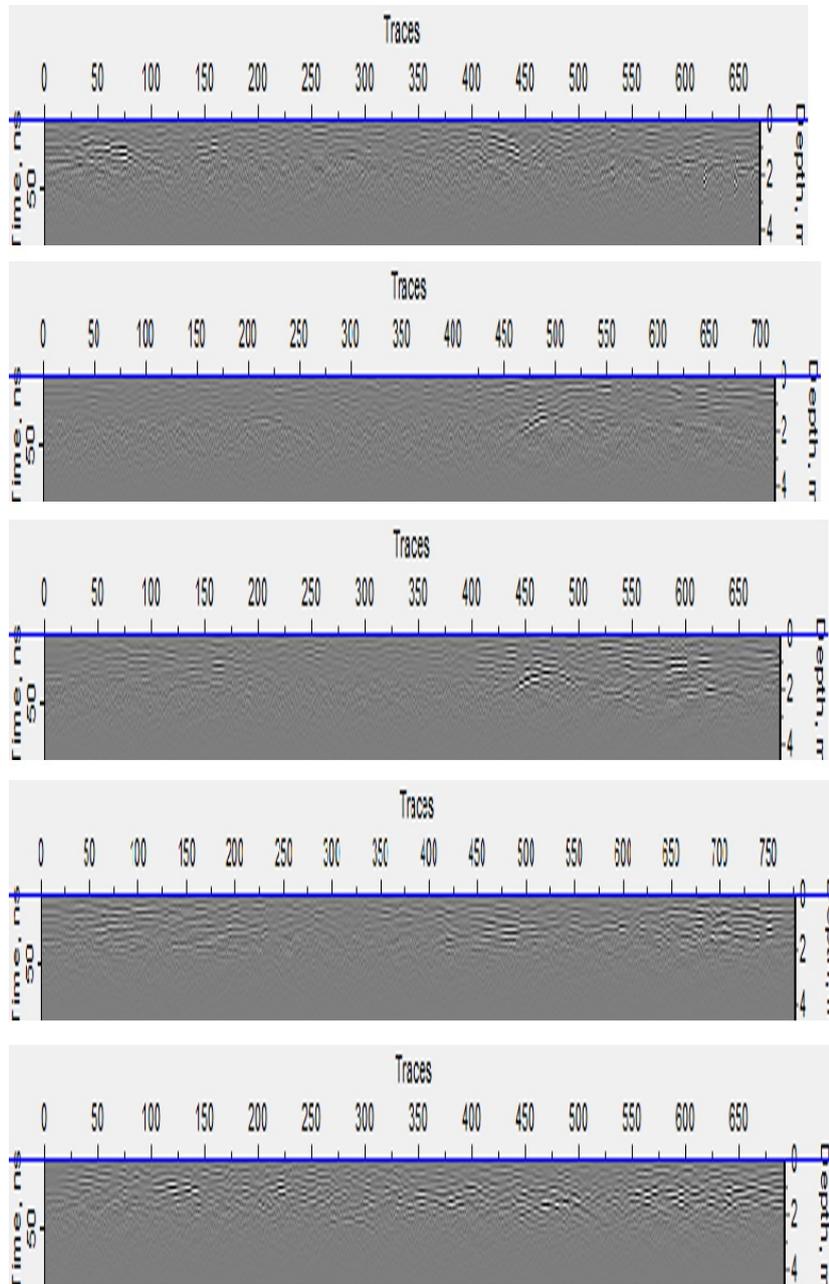


Figura 3.19: Radargramas do Rio Sauípe, margem direita, antena VIY 2 de 300 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

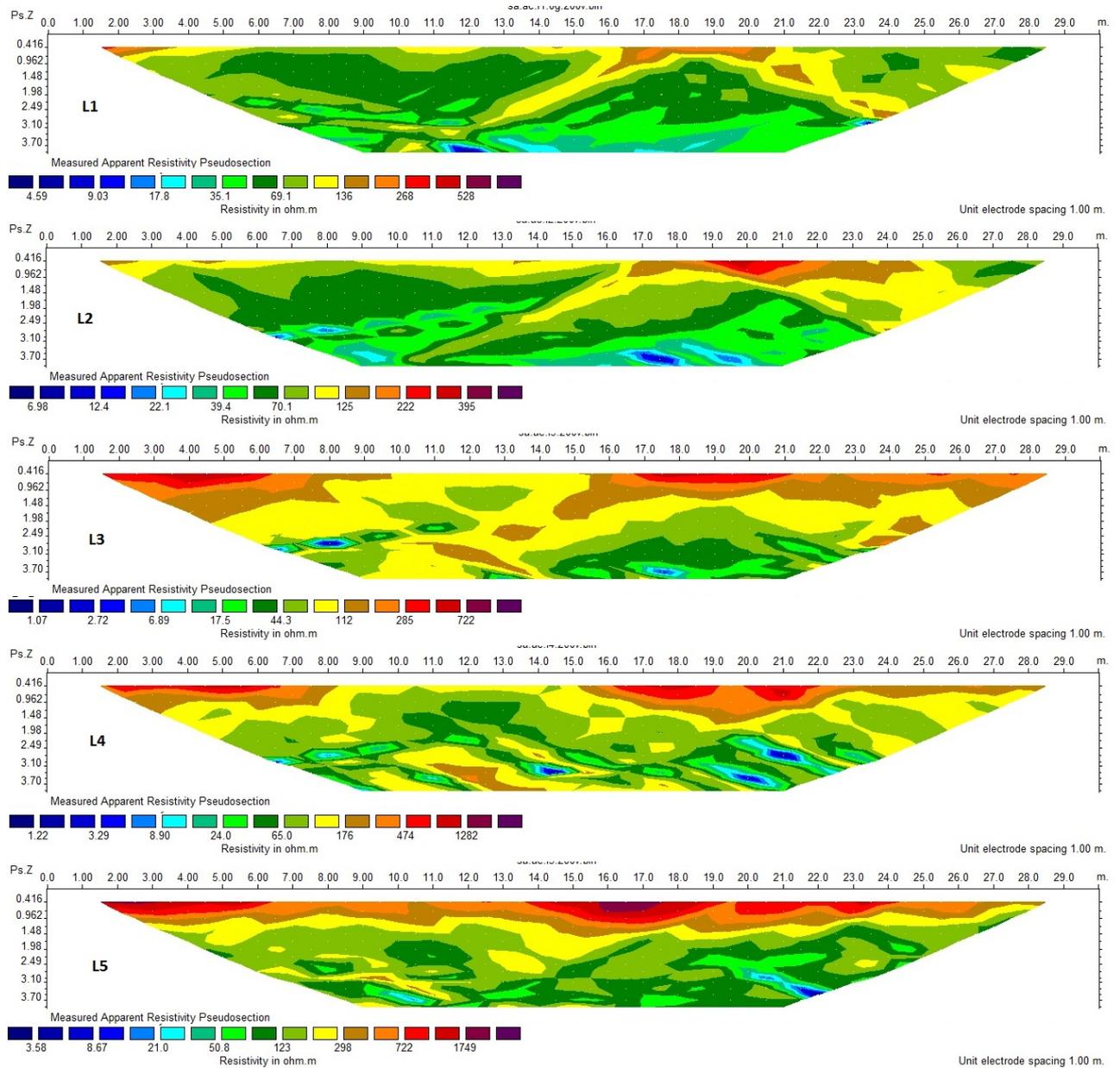


Figura 3.20: Perfis de resistividade aparente medida no Rio Sauípe, margem direita. Seção 1 acima e 5 abaixo.

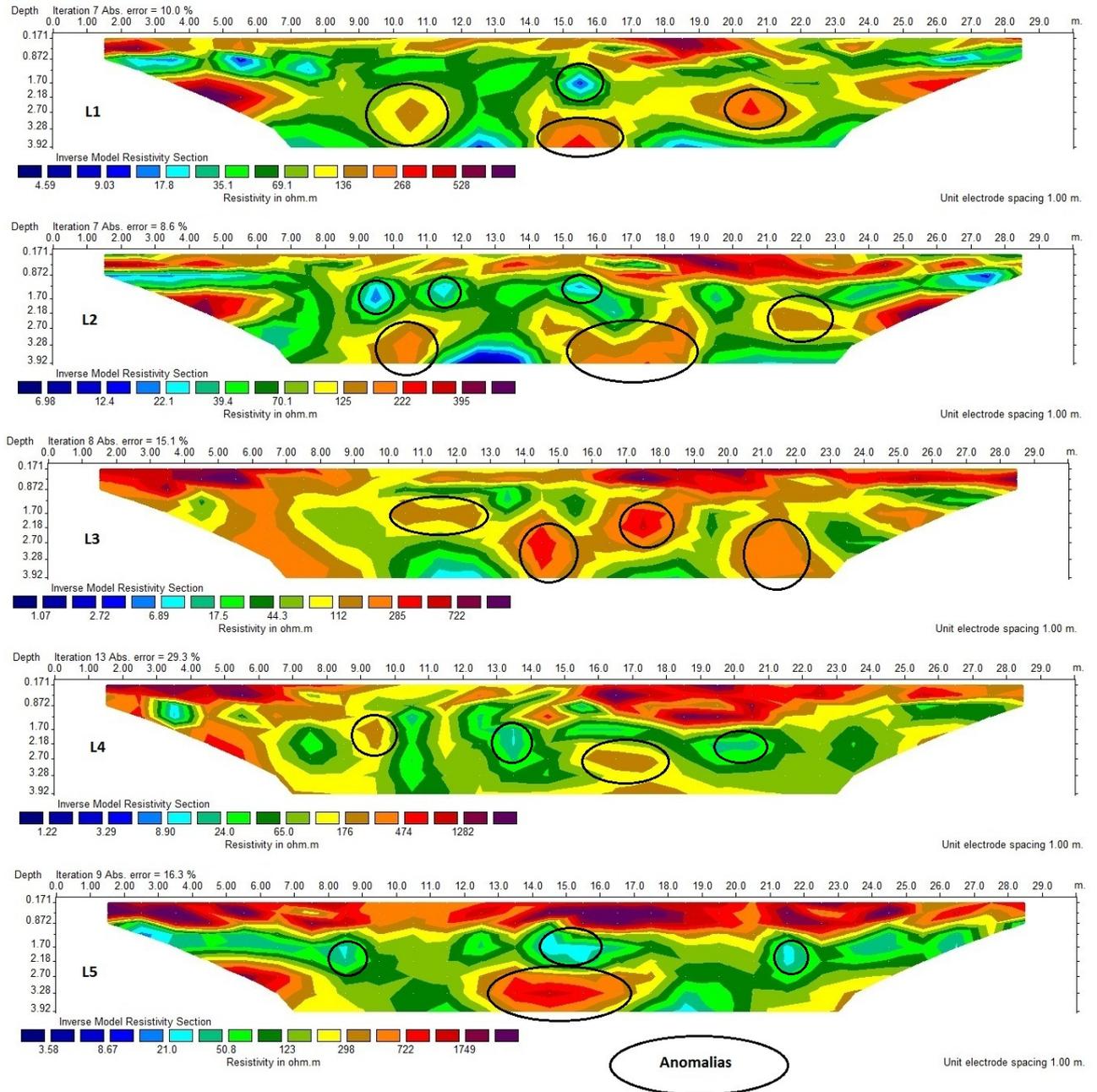


Figura 3.21: Perfis de resistividade aparente do modelo invertido do Rio Sauípe, margem direita. Seção 1 acima e 5 abaixo.

3.3 Rio Quiricó Grande

3.3.1 Margem esquerda

Nesta margem foram utilizadas as três frequências do RAMAC, mas não foram adquiridos perfis de eletrorresistividade devido ao tráfego de veículos pela faixa, o que impossibilitou a colocação dos eletrodos, pois não foi possível fazer a interdição da via. Apenas a seção 1 possui 30 m de comprimento. As demais são menores, pois no final das seções existe um morro muito íngreme que impossibilitou a aquisição de seções de 30 m com o GPR.

Como pode ser visto nas figuras 3.22, 3.23 e 3.24, os radargramas da seções 1 apresentam uma única hipérbole nas frequências de 100 e 200 MHz, que coincidem em profundidade (cerca de 2,30 m), mas estão deslocadas em cerca de 1,5 m de distância devido ao erro de aquisição com a antena de 100 MHz (indicado com a seta preta na figura 3.22). Este erro ocorreu, pois o mesmo ponto foi amostrado várias vezes devido ao deslocamento do odômetro e ao não deslocamento simultâneo da antena. O radargrama fornecido pela antena de 400 MHz exhibe apenas duas hipérbolas bem superficiais, que garantidamente não representam duto algum, pois não correspondem com as informações fornecidas nos radargramas das antenas de 100 MHz e 200 MHz. Os radargramas da seção 2 exibem 6 hipérbolas para as 3 frequências usadas, enquanto que os da seção 3 exibem apenas 4. Os radargramas das seções 4 e 5 exibem 4 hipérbolas para as frequências de 100 MHz e 200 MHz e apenas 3 para a frequência de 400 MHz. As distâncias e profundidades medidas em cada seção pelas 3 frequências são muito próximas, tendo uma variação de até 20 cm em profundidade, que se deve à pequena diferença encontrada na análise de velocidade pelas hipérbolas. Como esta análise é feita de maneira visual durante o processamento, este erro é considerado aceitável.

Analisando estas figuras é possível notar que a antena de 400 MHz possui um desempenho inferior às demais, pois sofre o efeito da geologia nas seções 4 e 5 além de sofrer uma atenuação superior à atenuação sofrida pelas outras antenas na seção 1, chegando a se tornar ineficaz nesta seção. É possível com isto mostrar mais uma vez a influência da saturação em água no desempenho do GPR.

Comparando-se as seções 2 com as seções 3, 4 e 5 (vide figuras 3.22, 3.23 e 3.24) é possível perceber que existem quatro dutos na faixa apenas, logo, duas das hipérbolas não são representativas dos alvos de estudos deste trabalho e estão marcadas com as setas vermelhas. Estas hipérbolas podem ter sido geradas por matacões presentes nas seções, ou até mesmo por pequenos pedaços de dutos abandonados. Para dirimir a dúvida entre estas duas opções pode-se usar o método eletromagnético indutivo (sensível a materiais magnéticos apenas) ou mesmo realizar a aquisição de uma seção espaçada de 2 a 3 m, antes e depois da seção 2, pois neste caso a hipérbole referente ao possível matacão não apareceria nos radargramas.

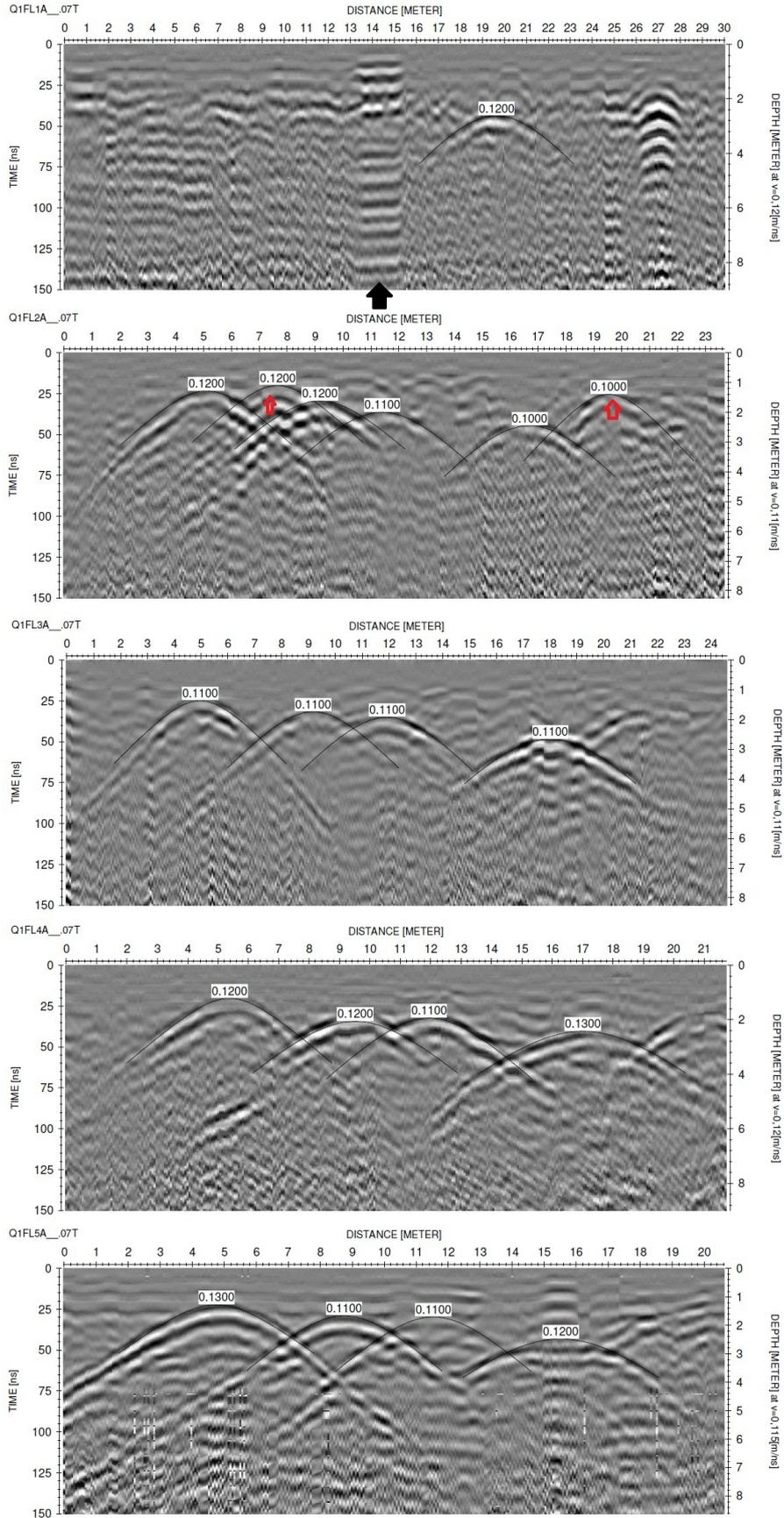


Figura 3.22: Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem esquerda, antena RA-MAC de 100 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

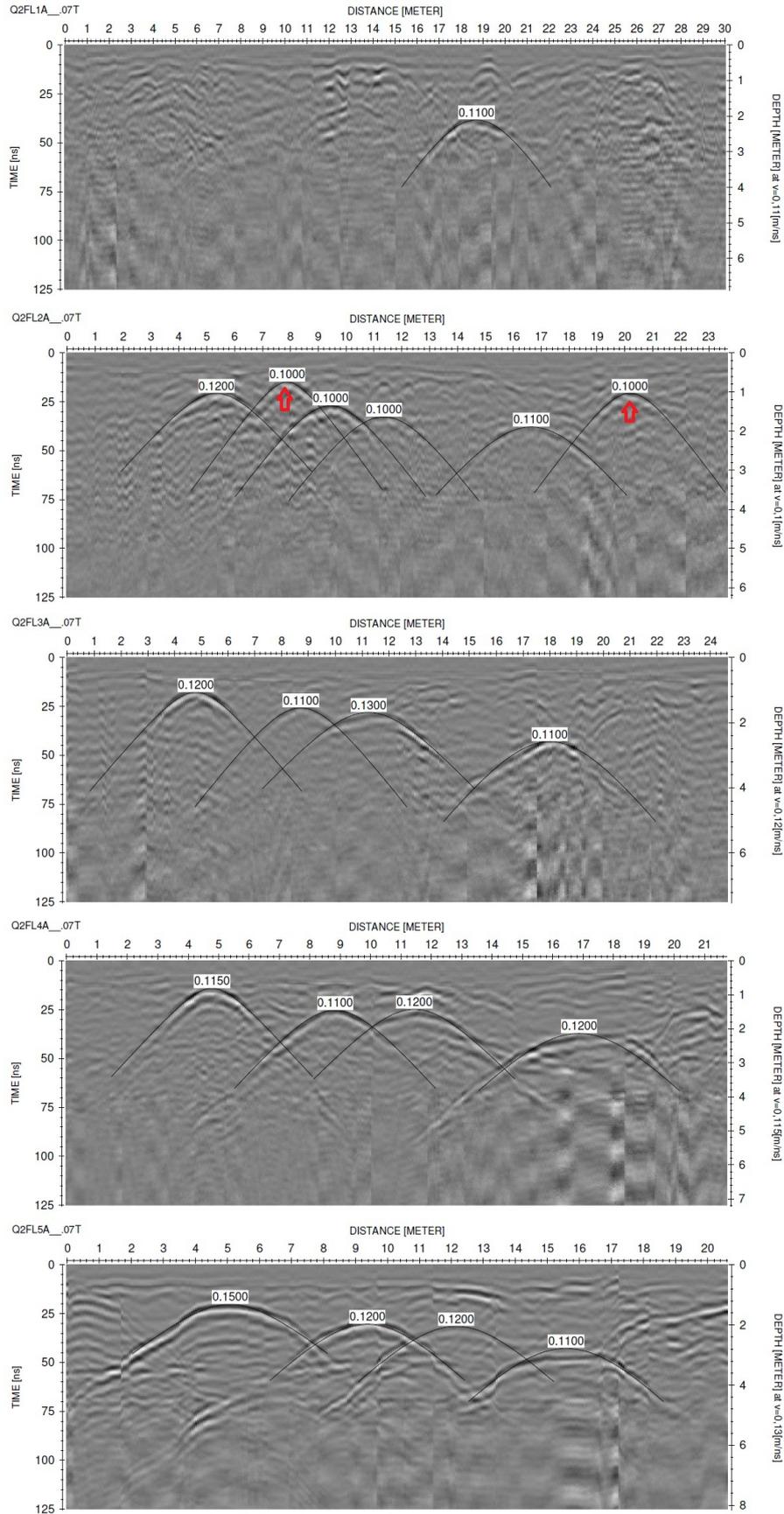


Figura 3.23: Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem esquerda, antena RA-MAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

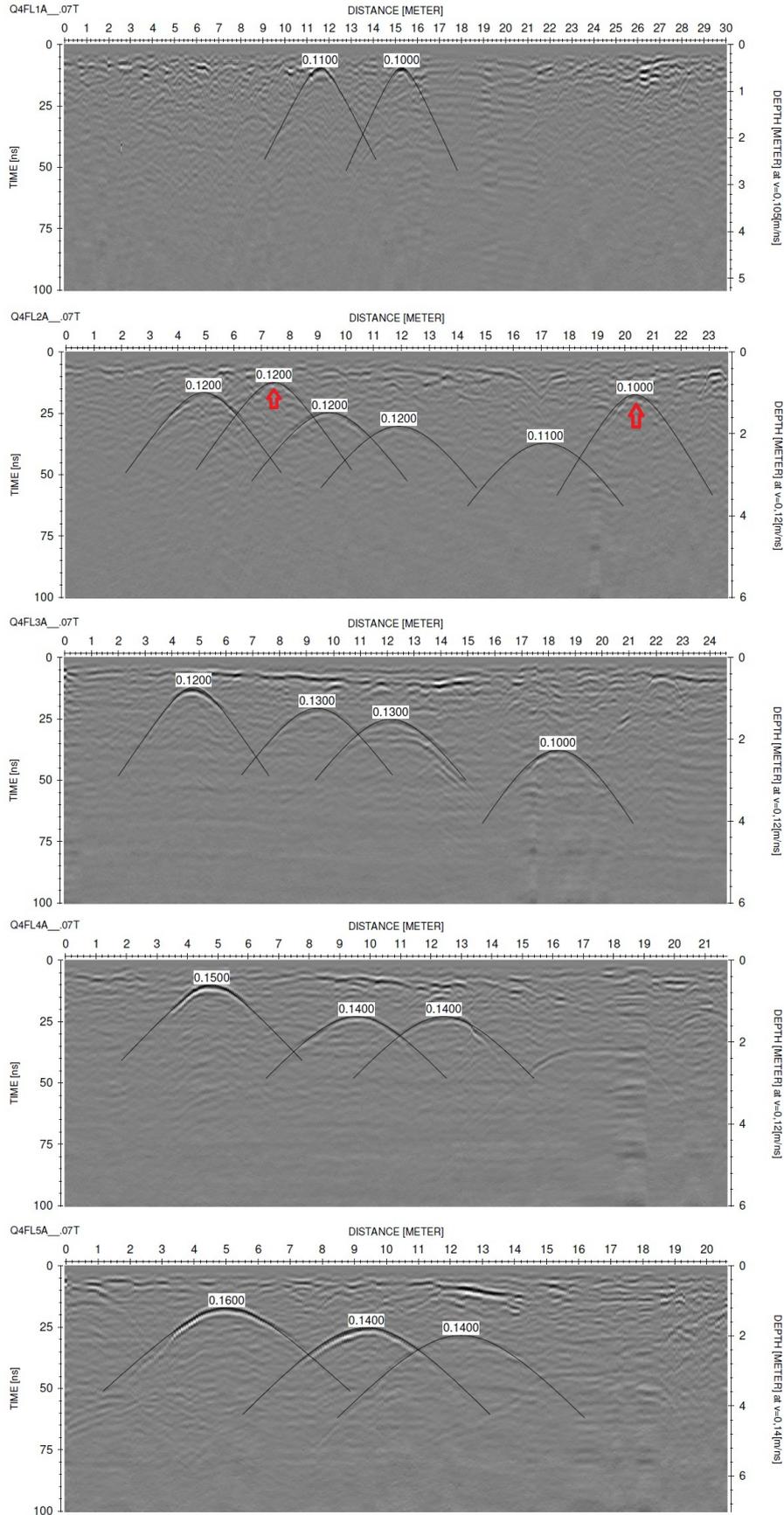


Figura 3.24: Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem esquerda, antena RA-MAC de 400 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

3.3.2 Margem direita

Nesta margem foram utilizadas as três frequências do RAMAC, além de terem sido adquiridos perfis de eletrorresistividade. Nesta margem não existe o problema do morro de modo que todas as seções possuem 30 m de comprimento.

Como pode ser visto nas figuras 3.25, 3.26 e 3.27, os radargramas da seção 1 apresentam três hipérbolos na frequência de 100 MHz e apenas duas hipérbolos nas frequências de 200 MHz e 400 MHz. Os radargramas da seção 2 exibem 4 hipérbolos na frequência de 100 MHz e apenas três hipérbolos nas frequências de 200 MHz e 400 MHz, enquanto que os da seção 3 exibem 5 hipérbolos na frequência de 100 MHz, 4 na de 200 MHz e 3 na de 400 MHz. Os radargramas das seções 4 exibem 4 hipérbolos nas frequências de 100 MHz e 200 MHz e 5 na de 400 MHz. Já os radargramas da seção 5 exibem 4 hipérbolos para as três frequências utilizadas.

Levando-se em consideração a informação fornecida pela área responsável da Transpetro de que existem apenas 4 dutos neste trecho da faixa e da confirmação desta informação pelos radargramas da margem esquerda, foi necessário muito cuidado e atenção na correlação dos dados dos radargramas mostrados nas figuras 3.25, 3.26 e 3.27 a fim de se determinar e identificar com uma seta vermelha as hipérbolos que não representam os dutos. As distâncias e profundidades medidas em cada seção pelas 3 frequências são muito próximas, tendo uma variação de até 35 cm em profundidade, que se deve à diferença encontrada na análise de velocidade pelas hipérbolos. Como esta análise é feita de maneira visual durante o processamento, este erro é considerado aceitável.

Analisando estas figuras é possível notar que as antenas tiveram desempenhos similares nas seções 2 à 5, mas na seção 1 a antena de 100 MHz teve desempenho superior às demais, pois foi a única capaz de imagear o duto que se encontra a 4,40 m de profundidade. É possível observar mais uma vez a influência da saturação em água no desempenho do GPR, pois só foi possível mapear os 4 dutos nas seções 3, 4 e 5 que estão mais afastadas do rio e por isso possuem uma saturação de água no solo menor.

É possível notar a existência de hipérbolos não relacionadas aos alvos (marcadas com setas) nos radargramas das seções 3 e 4 da antena de 100 MHz e seção 4 da antena de 400 MHz. Estas hipérbolos podem ter sido geradas por matacões presentes nas seções, ou até mesmo por pequenos pedaços de dutos abandonados. Para dirimir a dúvida entre estas duas opções pode-se usar o método eletromagnético indutivo (sensível a materiais magnéticos apenas) ou mesmo realizar a aquisição de uma seção espaçada de 2 a 3 m, antes e depois das seções 3 e 4, pois neste caso a hipérbole referente ao possível matacão não apareceria nos radargramas.

A figura 3.28 mostra a resistividade aparente medida nas seções de 1 a 5, enquanto

que a figura 3.29 mostra a resistividade do modelo após a inversão. Comparando os valores encontrados para cada seção com a qualidade dos dados do GPR nota-se uma perfeita correlação entre baixa resistividade elétrica (inferior a 100 ohm.m) e qualidade ruim dos dados do RAMAC.

Na seção 1 é possível notar que o GPR só foi capaz de localizar as tubulações que se encontravam na faixa de 10 a 13 m que é justamente uma região na qual a resistividade aparente calculada é superior a 90 ohm.m. Este mesmo padrão de correlação entre a qualidade do georadar e a resistividade aparente se repete em todas as outras seções de modo que pode-se considerar o valor de 90 ohm.m como limítrofe para a obtenção de resultados utilizando o sistema RAMAC, pois foi mostrado na seção 3.2.1 e 3.2.2 que o sistema VIY 2 foi capaz de fornecer informações de locais onde os valores de resistividades eram inferiores a este limite.

Nos perfis mostrados na figura 3.29 foram marcardos os pontos onde aparecem hipérboles nos radargramas das figuras 3.25, 3.26 e 3.27. Desta forma é possível perceber que não existe uma perfeita correlação entre todas as anomalias de resistividade e todas as hipérboles existentes nos radargramas. Apesar disso nas seções 1, 2 e 5 pontos de alta resistividade são encontrados nas mesmas posições que as hipérboles, entretanto pode-se notar uma zona de baixa resistividade nas seções 2,3,4 e 5 onde o GPR localiza a existência de 3 dutos. Desta forma sugere-se o uso do método eletrorresistivo em outras travessias de modo a gerar uma maior quantidade de dados que possam ser comparados com os resultados de outros métodos geofísicos, como o GPR por exemplo, de forma a definir se o método elétrico é capaz de detectar tubulações enterradas e qual será a resposta deste método para estas tubulações.

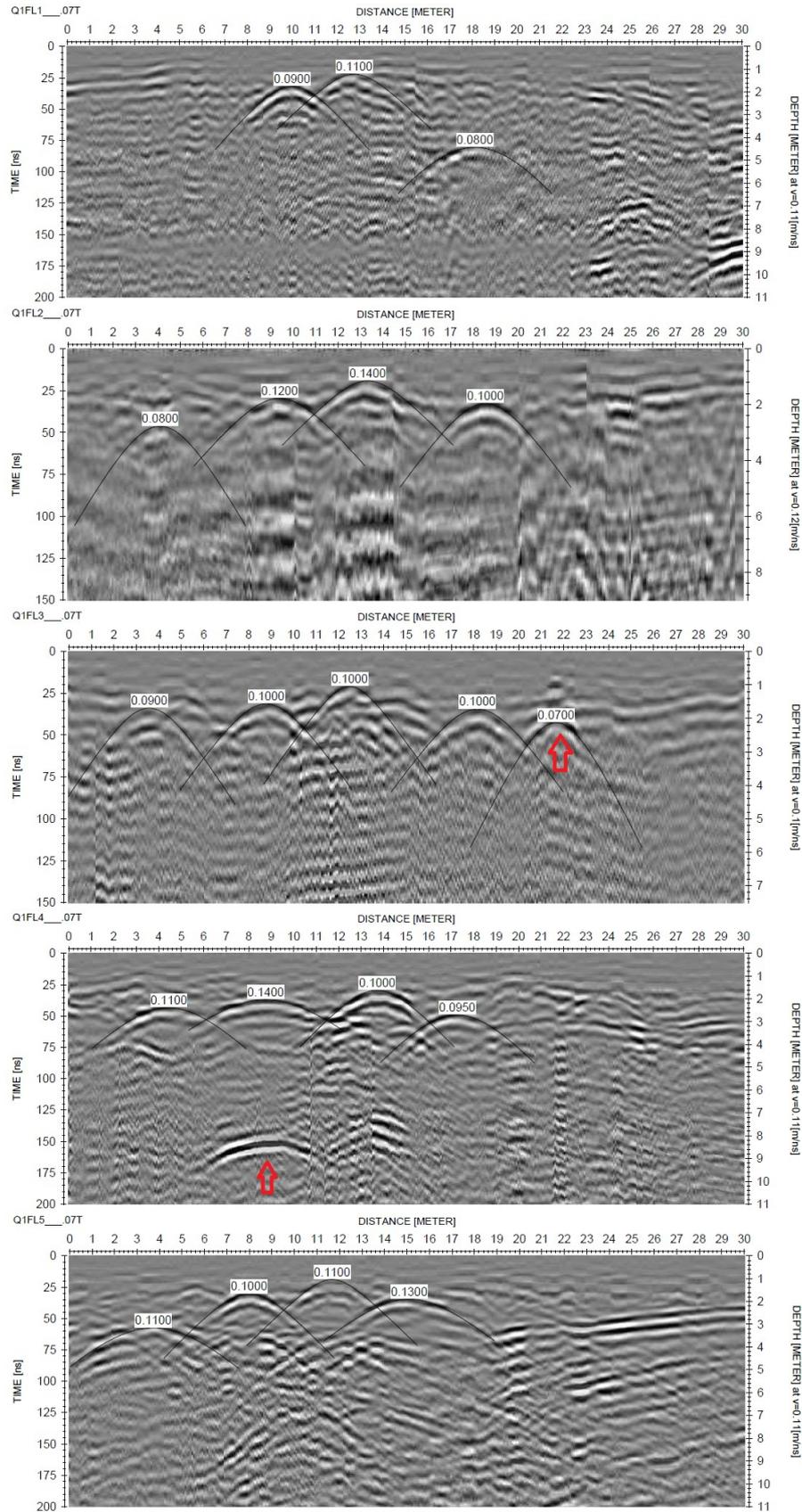


Figura 3.25: Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem direita, antena RAMAC de 100 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

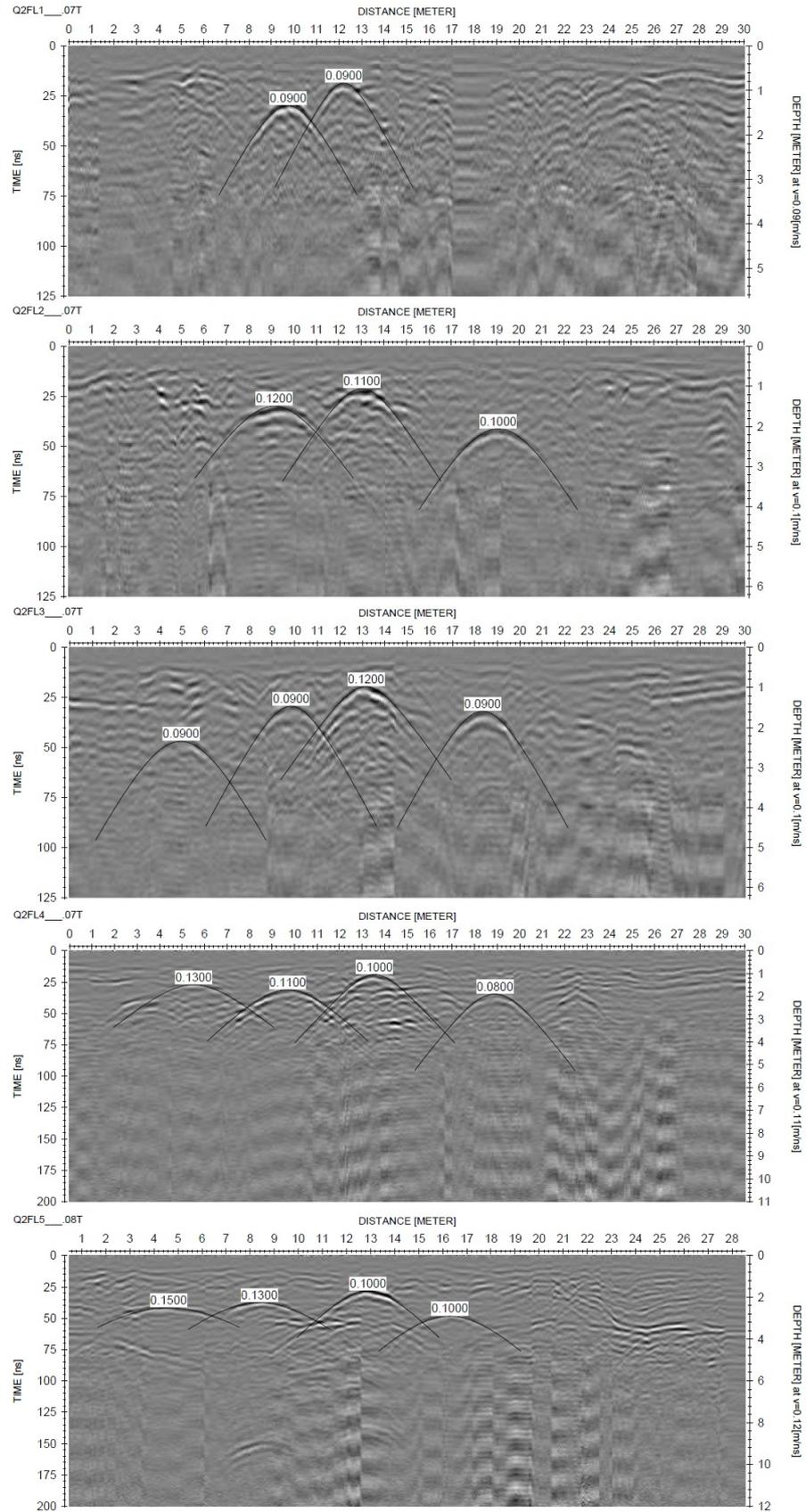


Figura 3.26: Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem direita, antena RAMAC de 200 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

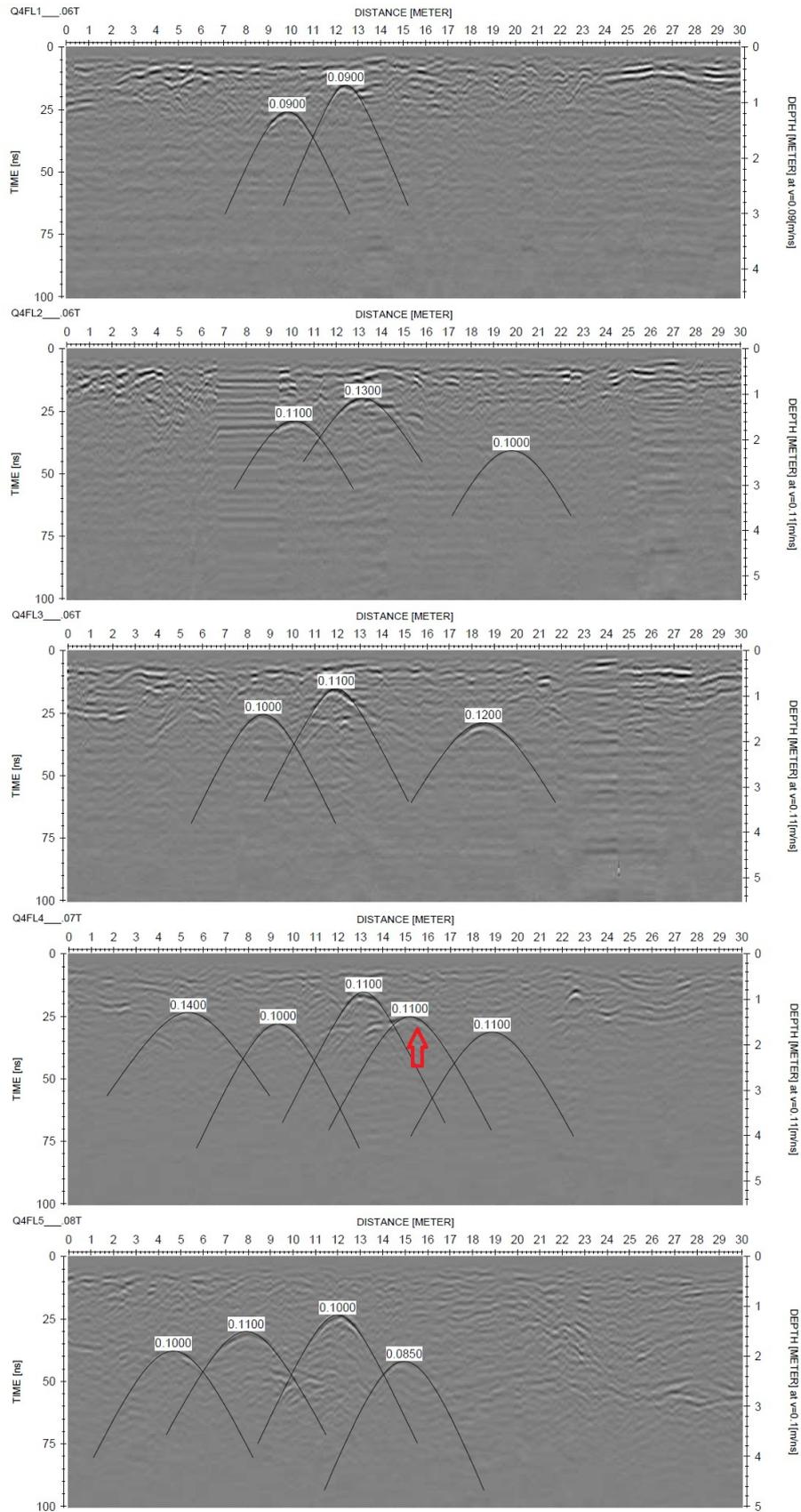


Figura 3.27: Radargramas do Rio Quiricó Grande, margem direita, antena RAMAC de 400 MHz. Seção 1 acima e 5 abaixo.

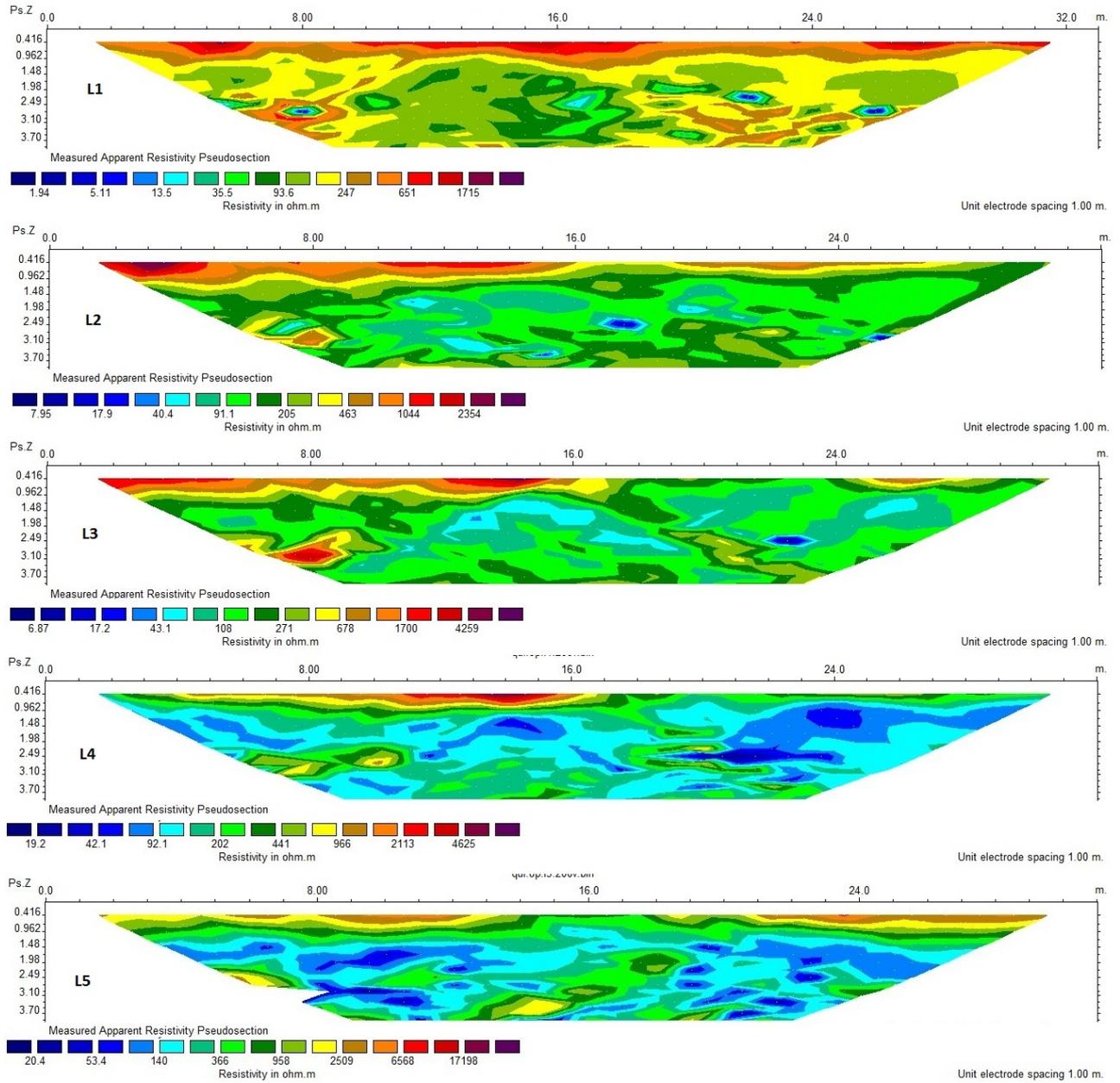


Figura 3.28: Perfis de resistividade aparente medida no Rio Quiricó Grande, margem direita. Seção 1 acima e 5 abaixo.

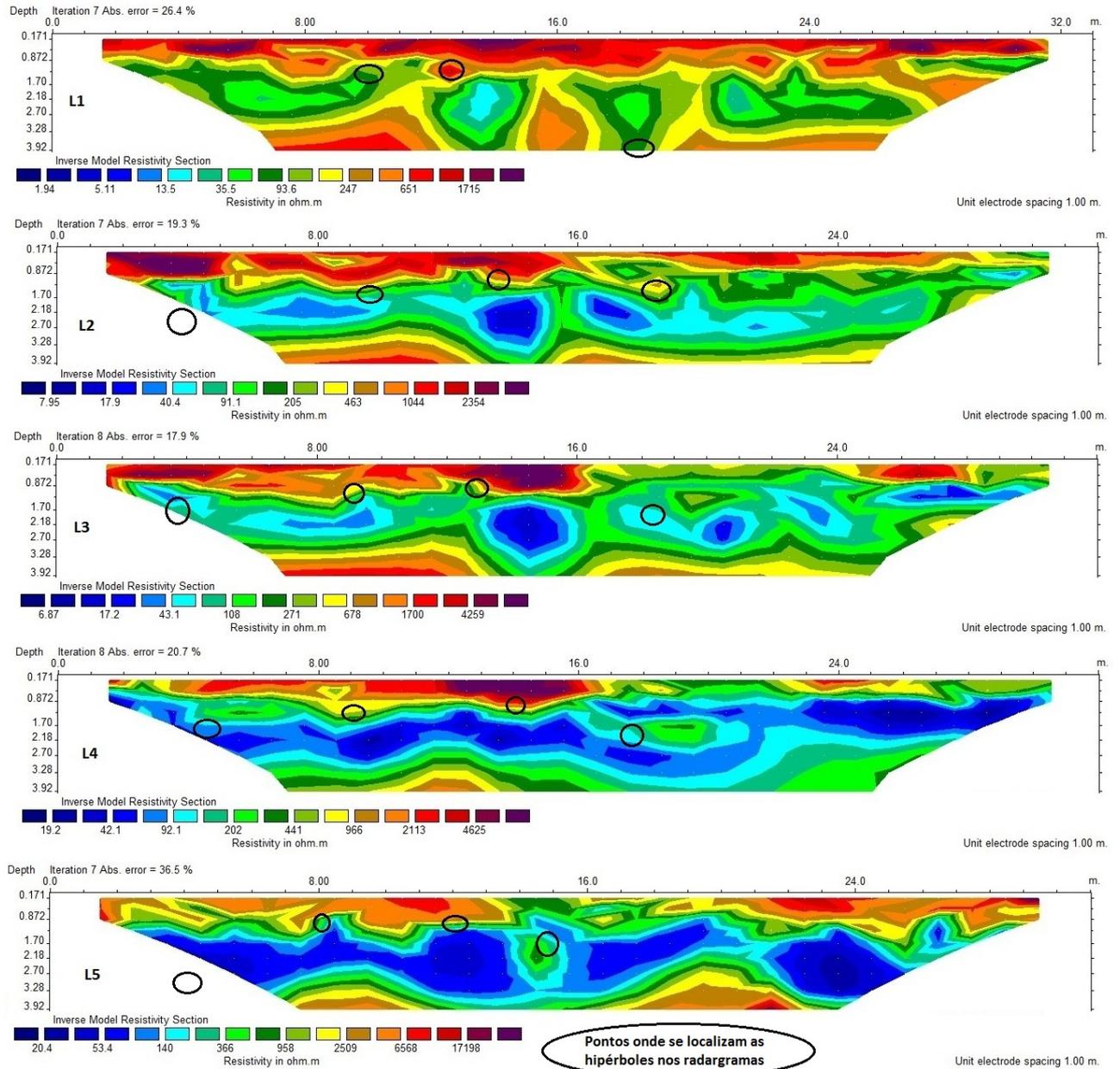


Figura 3.29: Perfis de resistividade aparente do modelo invertido do Rio Quiricó Grande, margem direita. Seção 1 acima e 5 abaixo.

CAPÍTULO 4

Conclusões

Os dados apresentados no capítulo 3 deste trabalho ratificam, mais uma vez, a aplicabilidade e limitações do uso do método GPR para a localização de tubulações enterradas. Os radargramas aqui apresentados mostram que existe uma correspondência no posicionamento e profundidade das hipérboles (representação gráfica dos dutos) encontradas nos radargramas do sistema RAMAC para as frequências de 100 MHz, 200 MHz e 400 MHz, como era de se esperar. Entretanto, na versão utilizada do VIY 2, a velocidade do meio é colocada *a priori* (no momento da aquisição foi escolhida a velocidade de 0.1 m/ns) e obtém-se as seções já em profundidade. Este procedimento não nos permite realizar uma análise sobre a curvatura das hipérboles difratadas nos tubos e assim dificulta seu emprego direto para determinar a verdadeira profundidade da geratriz superior dos tubos.

É possível notar a diminuição da qualidade dos radargramas à medida que as seções se aproximam dos rios. Fato que já era esperado, pois a proximidade do rio gera um aumento da saturação de água no solo que prejudica o desempenho do GPR. Este fato é mais intenso nas antenas de maior frequência de modo que a antena de 100 MHz, mostrou-se capaz de localizar dutos mais profundos, chegando a localizar um duto a 4,40 m de profundidade na seção 1 da margem direita do rio Quiricó Grande (seção 3.3.2), enquanto as outras duas frequências não foram capazes de fornecer informações sobre este duto. Entretanto a antena de 100 MHz, se mostrou ineficiente na localização de dutos que se encontram a menos de 1 m de profundidade, pois como pode ser visto na seção 3.2.1 apenas as antenas de 200 MHz foi capaz de localizar o duto que se encontra a 0,8 m de profundidade.

Nos locais onde houve a associação do método GPR com o método eletrorresistivo, foi possível correlacionar os dados contidos nos radargramas com os dados de resistividade aparente contidos nos perfis elétricos, de forma a mostrar que o modelo RAMAC foi capaz de fornecer informações de subsuperfícies somente nas regiões onde a resistividade aparente é superior a 90 ohm.m. Nas regiões cujos valores são inferiores a este limite o sinal deste sistema sofreu grande atenuação. O sistema VIY 2 de 125 MHz mostrou-se mais eficiente, pois conseguiu imagear a subsuperfície em locais onde o RAMAC falhou (vide seção 3.2.1 e 3.2.2), provando que o limite de resistividade aparente no qual este sistema ucraniano pode operar, fornecendo resultados aproveitáveis, é inferior à 90 ohm.m. Não foi possível, entretanto,

determinar o valor exato deste limite devido ao fato da escala horizontal dos radargramas deste sistema estar em números de traços, enquanto a escala do perfil de eletrorresistividade está em distância, e a escala vertical nos radargramas não indica a verdadeira profundidade dos dutos (fato explicado no primeiro parágrafo da conclusão). Vale frisar que apesar de não ter sido determinado neste trabalho, o sistema VIY 2 também possui um valor limite de resistividade, abaixo do qual o sistema não é capaz de fornecer informações úteis da subsuperfície.

Foi possível ainda observar algumas anomalias circulares/ovaladas nos perfis de resistividade aparente após a inversão dos dados. Algumas destas anomalias correspondem em distância e profundidade aos dutos mapeados pelo sistema RAMAC (vide figura 3.29). Entretanto também existem hipérbolas que estão numa região de baixa resistividade de forma que não foi possível obter uma resposta conclusiva sobre a capacidade do método eletrorresistivo localizar tubulações metálicas enterradas. Desta forma pode-se considerar este trabalho apenas como um estudo inicial sobre a eficácia do método eletrorresistivo 2D em localizar tubulações.

A utilização do método GPR para os objetivos deste trabalho já tem eficácia comprovada na literatura científica, respeitando-se, claro, as limitações acima citadas. Porém estudos mais detalhados podem ser feitos utilizando-se o método eletrorresistivo 2D, a fim de se comprovar ou não as informações preliminares contidas neste trabalho. Para tanto, sugere-se modificar o espaçamento de eletrodos, tipo de arranjo, voltagem utilizada nos eletrodos injetores de corrente, colocar-se os eletrodos iniciais e finais em torno de 8 m além das bordas das faixas para ganhar profundidade de investigação nos limites das faixas, além de diferentes locais de aquisição, variando com isto a profundidade e espessura dos dutos investigados, além do material do subsolo.

Agradecimentos

Agradeço a Deus e aos espíritos protetores, que me acompanharam durante a minha caminhada, pelos bons fluidos derramados sobre mim. Agradeço a meus pais, Aurelison e Leontina, por tudo que me ensinaram, pela confiança, amor e dedicação que sempre me deram. Sem dúvida alguma tenho em vocês os meus maiores exemplos de vida. Emile ter você ao meu lado é simplesmente mágico, obrigado por todo seu amor e carinho e sua força, os quais são minha fonte de inspiração. Obrigado a todos os meus familiares e amigos pelo carinho.

Agradeço a todos os professores que tive pelo conhecimento que adquiri. Em especial, agradeço ao Professor Botelho, pelos ensinamentos científicos e morais que me foram passados ao longo desses quase 3 anos de convivência.

Agradeço à PETROBRAS/TRANSPETRO pelo apoio financeiro recebido através do termo de cooperação UFBA/PETROBRAS/FAPEX de número 0050.0051297.09.9, pelo qual fui beneficiado com bolsa de auxílio à pesquisa e pude usufruir dos equipamentos de geofísica adquiridos para a execução do referido projeto.

Caros colegas e amigos, Pedro, Valois, Cabral, Gabriel, Luara, Lucas e Rodrigo, conviver com vocês estes 4 anos foi muito bom. Passamos por alguns momentos difíceis, mas também vivemos momentos marcantes juntos, dos quais jamais esqueerei.

Professora Jacira e Rodrigo Santos, obrigado pelo incentivo e pela torcida. Agora seremos colegas novamente, nesta, que sem dúvida, será a maior empresa do mundo em uma ou duas décadas.

Enfim, obrigado a todos que torceram por mim.

Referências

- Annan, A. P. e Cosway, S. W. (1992) Simplified gpr beam model for survey design, SEG Technical Program Expanded Abstracts, **11**(EG1.7):356 – 359.
- Annan, A. P. e Davis, J. L. (1976) Impulse radar soundings in permafrost, Radio Science, **11**:383 – 394.
- Benson, A. (1995) Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults and cavities, pp. 177 – 193.
- Bevan, B. W. e Kenyon, J. (1975) Ground penetrating radar for historical archaeology, MASCA Newsletter, **11**(2):2 – 7.
- Botelho, M. A. B. (2007) Prospecção de manganês com radar de penetração no solo (gpr) no oeste da bahia, 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Botelho, M. A. B. (2008) Manganese prospection with ground-penetrating radar (gpr) in bahia state brazil, 12th International Conference of Ground Penetrating Radar.
- Botelho, M. A. B. e Jorge, C. G. (2005) Avaliação geotécnica-geofísica das subestruturas da ferrovia vitória-minas (efvm) usando o radar de penetração no solo (gpr), 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Campbell, K. J. e Orange, A. S. (1974) A continuous profile of sea ice and freshwater ice thickness by impulse radar, Polar Record, **17**(106):34 – 41.
- Castro, D. D. e Branco, R. (2003) 4d ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in fortaleza (brazil) during its remediation process: a case history, pp. 127 – 144.
- Coon, J. B.; Fowler, J. C. e Shafers, C. J. (1981) Experimental uses of short pulse radar in coal seams, Geophysics, **46**:1163 – 1168.
- Darracott, B. W. e Lake, M. I. (1981) An initial appraisal of ground probing radar for site investigation in britain, Ground Engineering, **14**:14 – 18.
- Davis, J. L. e Annan, A. P. (1989) Ground-penetration radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geoph. Prosp., **37**(5):531 – 551.
- Davis, J. L.; Annan, A. P. e Vaughan, C. J. (1985) Placer exploration using radar and seismic methods, Can. Inst. Min. Bull., **80**:67 – 72.
- Dias, A. P. (2008) Avaliação sobre a eficiência do radar de penetração no solo (GPR) na detecção de dutos em travessias de rios, Dissertação de mestrado, Universidade Federal

da Bahia.

- Freitas, F. D. S. (2008) Modelagem geométrica de reservatórios em ambientes de águas doces: Estudo da sensibilidade de medidas de impedância na exploração petrolífera, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Harrison, C. H. (1970) Reconstruction of subglacial relief from radio echo sounding records, *Geophysics*, **35**:1109 – 1115.
- Jaya, M. S.; Botelho, M. A. B.; Hubral, P. H. W. e Liebhardt, G. (1999) Remigration of ground-penetrating radar data, *Journal of Applied Geophysics*, **41**:19–30.
- Leggo, P. J. e Leech, C. (1983) Subsurface investigations for shallow mine workings and cavities by the ground impulse radar technique, *Ground Engineering*, **16**:20 – 23.
- Mello, D. C. (2008) Investigando com GPR a planície litorânea de Barra do Jacuípe, litoral norte do estado da Bahia, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Mendes, L. A. O. (2008) Mapeamento de Interferências com GPR: Uma Aplicação na Mina Fazenda Brasileiro, Teofilândia, BA, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Neto, P. X. (2006) Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: Aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém - CE, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Pestana, R. C. e Botelho, M. A. B. (1997) Migração de dados de radar (gpr) com correção topográfica simultânea, *Revista Brasileira de Geofísica (impresso)*, **15**(1):3–10.
- Pinto, G. P. (2010) O método GPR aplicado a localização de tubulações utilizadas no abastecimento de água na região urbana do município de Belém-PA, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará.
- Porciúncula, R. J. (2007) Aplicação do método eletrorresistivo na avaliação geoambiental da região de Alagoinhas, Bahia, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Reynolds, J. M. (1997) *An introduction to applied and environmental geophysics*, England, John Wiley and Sons.
- Ribeiro, G. L. (2008) Avaliação Geométrica da Contaminação Urbano-industrial do Aquífero Recôncavo no Entorno de Alagoinhas, Bahia, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia.
- Sato, H. K. (1999) Notas de aula do curso de métodos geofísicos elétricos, CPGG - UFBA.
- Telford, W. M.; Geldart, L. e Sheriff, R. (1990) *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, United Kingdom, 2^o edic..
- Thierbach, R. (1974) Electromagnetic reflections in salt deposits, *Journal of Geophysics*, **40**:633 – 637.

- Ulriksen, C. P. F. (1982) Application of impulse radar to civil engineering, Doctoral thesis, Lund University of Technology, 179p.
- Unterberger, R. R. (1978) Radar propagation in rock salt, *Geophysical Prospecting*, **26**(2):312 – 328.
- Ward, S. (1987) *Electromagnetic theory for geophysical applications: electromagnetic methods in applied geophysics.*