



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

SAULO SIQUEIRA MARTINS

**ANÁLISE DE FEIÇÕES GEOLÓGICAS NA REGIÃO DE
TARTARUGALZINHO, AMAPÁ, ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

BELÉM
2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

SAULO SIQUEIRA MARTINS

**ANÁLISE DE FEIÇÕES GEOLÓGICAS NA REGIÃO DE
TARTARUGALZINHO, AMAPÁ, ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará – UFPA, para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.

Orientador: José Gouvêa Luiz

BELÉM
2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

- M386a Martins, Saulo Siqueira
Análise de feições geológicas na região de Tartarugalzinho,
Amapá, através de métodos geofísicos / Saulo Siqueira Martins –
2009
86 f. : il.
Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pós-
Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade
Federal do Pará, Belém, 2009.
Orientador; José Gouvêa Luiz
1. Método gravimétrico. 2. Adelgaçamento da crosta. 3.
Descontinuidades geológicas. 4. Escudo das Guianas. 5. GPR. 6.
Amapá. I. Universidade Federal do Pará. II. Luiz, José Gouvêa,
Orient. III. Título.

CDD 20. ed.: 526.7098116

SAULO SIQUEIRA MARTINS

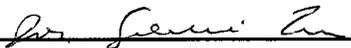
**ANÁLISE DE FEIÇÕES GEOLÓGICAS NA REGIÃO DE
TARTARUGALZINHO, AMAPÁ, ATRAVÉS DE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará – UFPA, para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.

DATA DE APROVAÇÃO: ___/___/2009

BANCA EXAMINADORA:



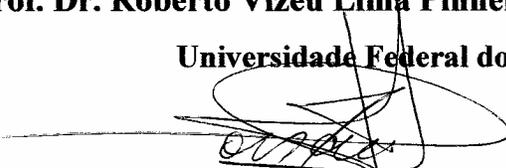
Prof. Dr. José Gouvêa Luiz (Orientador)

Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro (Co-orientador)

Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Jorge Luís Porsani (Membro)

Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa de mestrado.

Ao CPGF/UFPA pela oportunidade de dada a mim cursar uma pós-graduação.

À FINEP, financiadora do projeto Integração de dados Geofísicos, Geológicos e Geoquímicos na Reconstrução da Paleogeografia da Costa Amazônica do Terciário ao Recente-AMASIS, que forneceu apoio durante a coleta dos dados de campo.

Ao meu orientador, professor José Gouvêa Luiz, pelos ensinamentos, esclarecimentos e paciência na correção deste trabalho.

Ao professor Roberto Vizeu Lima Pinheiro, pela ajuda no preparo desta dissertação, bem como pela indicação deste tema para a dissertação.

Ao professor Jorge Luís Porsani pelas sugestões apresentadas durante a defesa desta dissertação, que ajudaram a melhorar o seu conteúdo.

À geóloga Dra. Lúcia Travassos da Rosa-Costa, pela ajuda com a elaboração do texto e ajuda com a compreensão geológica da área de estudo.

Aos professores da pós-graduação, pela ajuda e contribuição na minha formação.

Aos técnicos em geofísica Afonso Quaresma de Lima e Alberto Leandro de Melo pelo auxílio na coleta dos dados geofísicos.

Ao colega Clístenes Pamplona Catete pela ajuda na elaboração dos mapas deste trabalho.

Aos meus amigos de todas as horas Aldilene Saraiva, Anderson Coelho, Emanuel Negrão e Marcílio Amorim, que sempre estiveram ao meu lado todas as vezes que precisei.

À minha namorada Carla Patrícia, pela paciência, compreensão e incentivo em todos os momentos durante o curso.

Aos amigos de curso Diego Miranda, João Andrade e Ligia Naia pela amizade e companheirismo.

Ao amigo João da Cruz, pelo companheirismo junto a minha mãe.

À minha tia Aldilene, que junto cuidamos da casa e um do outro.

À minha irmã Samantha, pois ela sempre me fez ficar de bom humor quando precisava.

Ao meu pai que sempre me deu todo o apoio e incentivo possível, não apenas durante o curso, mas ao longo de toda minha vida.

RESUMO

Dois métodos geofísicos foram aplicados para a detecção de estruturas geológicas na borda oriental do Escudo das Guianas. O método gravimétrico foi aplicado para encontrar falhas, discordâncias e descontinuidades no embasamento, associadas a cinturões de cisalhamento que possuem orientação NW-SE, e o posicionamento da profundidade com que o embasamento se encontra da superfície. Foram encontradas falhas no embasamento e também indicações de que a crosta apresenta um afinamento em certa região da borda. O método eletromagnético GPR foi utilizado para encontrar descontinuidades geológicas nas rochas sedimentares e averiguar se essas feições são o reflexo das falhas no embasamento e/ou reativação de algumas delas. O GPR localizou feições interpretadas como descontinuidades em rochas e paleoestruturas. O estudo teve o intuito de compreender como as descontinuidades do embasamento podem ter influenciado na formação de bacias sedimentares do Terciário e na formação de paleoestruturas rasas.

Palavras-chaves: Escudo das Guianas. Adelgaçamento da crosta. Descontinuidades geológicas. Método gravimétrico. GPR.

ABSTRACT

Two geophysical methods were applied to detect geologic structures on the oriental edge of the Guianas Shield. The gravimetric method was applied mainly to find faulting on the basement, associated to shear belts that have orientation NW-SE. It was found faulting on the basement as well as an indication that the crust suffered a thinning in some region of the edge. The GPR electromagnetic method was applied to find geologic discontinuities on the sediments and to check if they are reflex of structural faults on the basement and/or reactivation of some of them. The GPR showed places where discontinues and some paleostructures can be observed. The study was also applied to understand how the basement discontinuities can influence on the formation of Tertiary sedimentary basins and on the formation of shallow paleostructures.

Key-word: Guianas Shield. Crustal thinning. Geologic Discontinuities, Gravimetry. GPR.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Províncias geotectônicas da América do Sul. | 14 |
| Figura 2.2 – Província geocronológica do Cráton Amazônico. | 16 |
| Figura 2.3 – Principais estruturas presentes na porção oriental do Escudo das Guianas, no estado do Amapá. O retângulo destaca a área de estudo enfocada nesta dissertação..... | 17 |
| Figura 2.4 – Principais unidades litológicas da porção oriental do Escudo das Guianas..... | 18 |
| Figura 3.1 – Aceleração atuante na superfície da terra..... | 21 |
| Figura 3.2 – Efeito da topografia no gravímetro. | 23 |
| Figura 3.3 – Ilustração conceitual do GPR sendo usado em um perfil do solo acima do leito rochoso. | 26 |
| Figura 3.4 – Radargrama, mostrando os registros de reflexão obtidos no perfil da Figura 3.3. ... | 27 |
| Figura 3.5 – Relação entre velocidade e frequência para várias condutividades. | 28 |
| Figura 3.6 – Modo de aquisição de afastamento constante. | 33 |
| Figura 3.7 – Modo de aquisição de dados WARR. | 33 |
| Figura 3.8 – Modo de aquisição de dados CMP..... | 34 |
| Figura 3.9 – Transiluminação poço a poço e poço superfície. | 34 |
| Figura 3.10 – Transiluminação utilizada em galerias de minas. | 35 |
| Figura 3.11 – Transiluminação utilizada para encontrar fraturas em concreto. | 35 |
| Figura 4.1 – Medida gravimétrica na estação base em Tartarugalzinho. | 37 |
| Figura 4.2 – Operação de medidas com o GPR..... | 38 |
| Figura 5.1 – Posição das medidas gravimétricas ao longo da BR-156 (em verde) e reta de projeção (em azul escuro)..... | 40 |
| Figura 5.2 – (A) Perfil dos valores medidos e calculados da anomalia Bouguer. (B) Modelo interpretativo para a Crosta e Manto. Em amarelo o manto com densidade de 3.2 g/cm^3 , em laranja a crosta inferior com densidade de 2.9 g/cm^3 e em vermelho e roxo a crosta superior com densidades de 2.6 g/cm^3 (vermelho) e 2.9 g/cm^3 (roxo) respectivamente..... | 42 |
| Figura 5.3 – (A) Perfil dos valores medidos e calculados da anomalia Bouguer. (B) Modelo interpretativo para a Crosta superior e rochas sedimentares. Em laranja, vermelho e roxo a crosta com densidade de 2.6 g/cm^3 , 2.62 g/cm^3 e 2.64 g/cm^3 respectivamente e em amarelo a cobertura sedimentar com densidade 1.9 g/cm^3 | 43 |
| Figura 5.4 – Localização dos perfis de GPR. | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.5 – Posicionamento em detalhe dos perfis 1 e 2 mostrados na Figura 5.4..... | 45 |
| Figura 5.6 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 1 completo | 47 |
| Figura 5.7 – Detalhe do perfil 1 de GPR mostrando o intervalo de 0 a 18 m. | 47 |
| Figura 5.8 – Detalhe do perfil 1 de GPR mostrando o intervalo de 147 a 183 m. | 48 |
| Figura 5.9 – Detalhe do perfil 1 de GPR mostrando o intervalo de 324 a 346 m. | 48 |
| Figura 5.10 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 2 completo. | 50 |
| Figura 5.11 – Detalhe do perfil 2 de GPR mostrando o intervalo de 0 a 23 m. | 50 |
| Figura 5.12 – Detalhe do perfil 2 de GPR mostrando o intervalo de 64 a 110 m. | 51 |
| Figura 5.13 – Detalhe do perfil 2 de GPR mostrando o intervalo de 132 a 176 m. | 51 |
| Figura 5.14 – Posicionamento em detalhe dos perfis 3 e 4 mostrados na Figura 5.4..... | 52 |
| Figura 5.15 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 3 completo. | 53 |
| Figura 5.16 – Detalhe do perfil 3 de GPR mostrando o intervalo de 100 a 132 m. | 53 |
| Figura 5.17 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 4 completo. | 55 |
| Figura 5.18 – Detalhe do perfil 4 de GPR mostrando o intervalo de 138 a 156 m. | 55 |
| Figura 5.19 – Detalhe do perfil 4 de GPR mostrando o intervalo de 250 a 267 m. | 56 |
| Figura 5.20 – Detalhe do perfil 4 de GPR mostrando o intervalo de 280 a 296 m. | 56 |
| Figura 5.21 – Detalhe do posicionamento do perfil 5 mostrado na Figura 5.4. | 57 |
| Figura 5.22 – Detalhe do posicionamento dos perfis 6 e 7 mostrados na Figura 5.4..... | 59 |
| Figura 5.23 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 5 completo. | 60 |
| Figura 5.24 – Detalhe do perfil 5 de GPR mostrando o intervalo de 54 a 116 m. | 60 |
| Figura 5.25 – Detalhe do perfil 5 de GPR mostrando o intervalo de 227 a 245 m. | 61 |
| Figura 5.26 – Detalhe do perfil 5 de GPR mostrando o intervalo de 460 a 478 m. | 61 |
| Figura 5.27 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 6 completo. | 62 |
| Figura 5.28 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 7 completo. | 62 |
| Figura 5.29 – Detalhe do perfil 7 de GPR mostrando o intervalo de 27 a 43 m. | 63 |
| Figura 5.30 – Detalhe do perfil 7 de GPR mostrando o intervalo de 323 a 339 m. | 63 |
| Figura 5.31 – Detalhe do posicionamento do perfil 8 mostrado na Figura 5.4. | 64 |
| Figura 5.32 – Imagem de GPR mostrando a Seção 1 do perfil 8. | 65 |
| Figura 5.33 – Imagem de GPR mostrando a Seção 2 do perfil 8. | 65 |
| Figura 5.34 – Detalhe do perfil 8 de GPR mostrando o intervalo de 668 a 689 m. | 66 |
| Figura 5.35 – Detalhe do posicionamento do perfil 9 mostrado na Figura 5.4. | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.36 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 9 completo. | 68 |
| Figura 5.37 – Detalhe do perfil 9 sobre o intervalo 60 a 120 m..... | 68 |
| Figura 5.38 – Detalhe do perfil 9 cobrindo o intervalo de 120 a 180 m..... | 69 |
| Figura 5.39 – Detalhe do posicionamento do perfil 10 mostrado na Figura 5.4. | 70 |
| Figura 5.40 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 10 completo. | 71 |
| Figura 5.41 – Detalhe do perfil 10 cobrindo o intervalo de 284 a 360 m..... | 71 |
| Figura 5.42 – Detalhe do perfil 10 cobrindo o intervalo de 458 a 500 m..... | 72 |
| Figura 5.43 – Detalhe do posicionamento do perfil 11 mostrado na Figura 5.4. | 73 |
| Figura 5.44 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 11 completo. | 74 |
| Figura 5.45 – Detalhe do perfil 11 sobre o intervalo de 120 a 212 m. | 74 |
| Figura 5.46 – Detalhe do perfil 11 sobre o intervalo de 194 a 275 m. | 75 |
| Figura 5.47 – Detalhe do perfil 11 sobre o intervalo de 186 a 213 m. | 75 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 | GEOLOGIA LOCAL E REGIONAL DA ÁREA DE TRABALHO | 14 |
| 2.1 | GEOLOGIA REGIONAL | 14 |
| 2.2 | GEOLOGIA LOCAL | 16 |
| 3 | REVISÃO DE CONCEITOS | 19 |
| 3.1 | MÉTODO GRAVIMÉTRICO..... | 19 |
| 3.1.1 | Introdução | 19 |
| 3.1.2 | Teoria do Método Gravimétrico | 19 |
| 3.1.2.1 | Lei de Newton da Gravitação Universal..... | 19 |
| 3.1.2.2 | Gravidade da Terra | 21 |
| 3.1.2.3 | Correções da Gravidade | 22 |
| 3.1.2.3.1 | <i>Correção de Latitude.....</i> | <i>22</i> |
| 3.1.2.3.2 | <i>Correção de Elevação (Ar-livre).....</i> | <i>22</i> |
| 3.1.2.3.3 | <i>Correção Bouguer</i> | <i>23</i> |
| 3.1.2.3.4 | <i>Correção Topográfica ou de Terreno</i> | <i>23</i> |
| 3.1.2.3.5 | <i>Correção de Maré</i> | <i>24</i> |
| 3.1.2.3.6 | <i>Correção da Variação Instrumental</i> | <i>24</i> |
| 3.1.3 | Densidade das Rochas | 24 |
| 3.2 | RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR)..... | 24 |
| 3.2.1 | Introdução | 24 |
| 3.2.2 | Histórico | 25 |
| 3.2.3 | Teoria do Método GPR | 26 |
| 3.2.3.1 | Princípio de Funcionamento..... | 26 |
| 3.2.3.2 | Teoria Eletromagnética | 28 |
| 3.2.4 | Operação com GPR..... | 32 |
| 3.2.4.1 | Perfis de Reflexão com Afastamento Constante | 32 |
| 3.2.4.2 | Sondagem de Velocidade | 33 |
| 3.2.4.3 | Modo de Transiluminação ou Tomografia | 34 |

| | | |
|-------|---|-----------|
| 3.2.5 | Processamento dos Dados | 35 |
| 4 | AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS | 37 |
| 4.1 | MÉTODO GRAVIMÉTRICO..... | 37 |
| 4.2 | MÉTODO GPR | 38 |
| 5 | INTERPRETAÇÃO E RESULTADOS..... | 40 |
| 5.1 | GRAVIMETRIA | 40 |
| 5.2 | GPR | 44 |
| 6 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 76 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 78 |
| | ANEXO A – MEDIDAS DE GRAVIDADE E COORDENADAS GEOGRÁFICAS DAS ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS..... | 82 |
| | ANEXO B – COORDENADAS GEOGRÁFICAS DAS POSIÇÕES DO GPR..... | 84 |

1 INTRODUÇÃO

O embasamento do Cráton Amazônico, na região do litoral norte do Brasil, é cortado por zonas de cisalhamento que compõem os sistemas estruturais dos cinturões de alto grau metamórfico e dos terrenos granito-*greenstone*, cujo desenvolvimento remonta ao Arqueano. Muitas dessas zonas de cisalhamento experimentaram reativação durante a evolução do Proterozóico Médio-Superior, relacionadas ao Ciclo Transamazônico (ROSA-COSTA, 2006). As unidades pertencentes ao Cráton Amazônico são: o Escudo das Guianas e as coberturas fanerozóicas (Terciário e Quaternário), objeto de estudo do projeto Integração de dados Geofísicos, Geológicos e Geoquímicos na Reconstrução da Paleogeografia da Costa Amazônica do Terciário ao Recente.

Como parte da atividade do projeto, foi realizado levantamento geofísico com os métodos Gravimétrico e Radar de Penetração no Solo (GPR) ao longo da BR-156 e adjacências, às proximidades da cidade de Tartarugalzinho, no estado do Amapá, na borda oriental do Escudo das Guianas.

No Brasil, vários estudos empregando o método gravimétrico têm sido realizados principalmente com o objetivo de identificar e mapear a geometria e a cinemática de falhas. Dentre os resultados obtidos destacam-se: caracterização de zonas de adelgaçamento crustal (NOGUEIRA; CASTRO, 1999); mapeamento de heterogeneidade crustal, devido a presença de domínios estruturais distintos, destacando-se as bacias sedimentares costeiras (NOGUEIRA; BEZERRA; CASTRO, 2006); e informações sobre atividade tectônica transtraccional neogênica, com falhamento e basculamento de blocos associados (PINTO; USSAMI; SÁ, 2007).

Estudos com o GPR aplicado na identificação e mapeamento de deformações estruturais não são muito frequentes no Brasil, por causa da pequena profundidade de investigação do método, que geralmente não ultrapassa 30 m. Dentre os poucos desenvolvidos, encontram-se o de Aranha e Sobreira (2005), que teve como principal objetivo localizar e analisar a continuidade em profundidade de fraturas observadas na superfície, e o de Nogueira et al (2005) que estudaram deformações tectônicas em depósitos sedimentares relacionados à geometria de falhas neógenas.

O levantamento geofísico realizado na BR-156, objeto desta dissertação, teve como objetivo mapear discontinuidades do embasamento usando o método gravimétrico e visualizar

com o GPR estruturas neotectônicas associadas às estruturas do embasamento e a geometria dos depósitos terciários no Amapá, o que poderá fornecer informações sobre a história tectono-sedimentar de bacias costeiras da Amazônia.

Esta dissertação contém seis capítulos. Ela inicia com esta introdução (Capítulo 1). Em seguida são apresentadas a geologia regional e geologia local da área de estudo (Capítulo 2), onde se destacam os principais modelos evolutivos propostos para o Cráton Amazônico, com ênfase nos aspectos geológicos e geocronológicos da porção oriental do Cráton, onde a área de estudo está localizada. A seguir, é apresentada uma revisão de conceitos, descrevendo as teorias dos métodos Gravimétrico e Radar de Penetração no Solo (Capítulo 3). No capítulo 4 é apresentada a aquisição e processamento dos dados coletados, desde o levantamento de campo à interpretação dos dados. Os resultados obtidos são apresentados e analisados em detalhes no capítulo 5. As considerações finais são expostas no capítulo 6, onde também são apresentadas recomendações para futuros trabalhos.

2 GEOLOGIA LOCAL E REGIONAL DA ÁREA DE TRABALHO

2.1 GEOLOGIA REGIONAL

O continente sul-americano é constituído por três grandes unidades geotectônicas, são elas: (1) a Plataforma Sul-Americana, (2) a Faixa Orogênica Andina e (3) a Plataforma Patagônica. A Plataforma Sul-Americana, onde o Brasil está situado, é constituída pelo Escudo das Guianas, o Escudo Brasil Central e o Escudo Atlântico, e mais uma cobertura fanerozóica sedimentar, correspondentes às bacias do Amazonas-Solimões, do Paraná e do Parnaíba, como mostrado na Figura 2.1 (ROSA-COSTA, 2006).

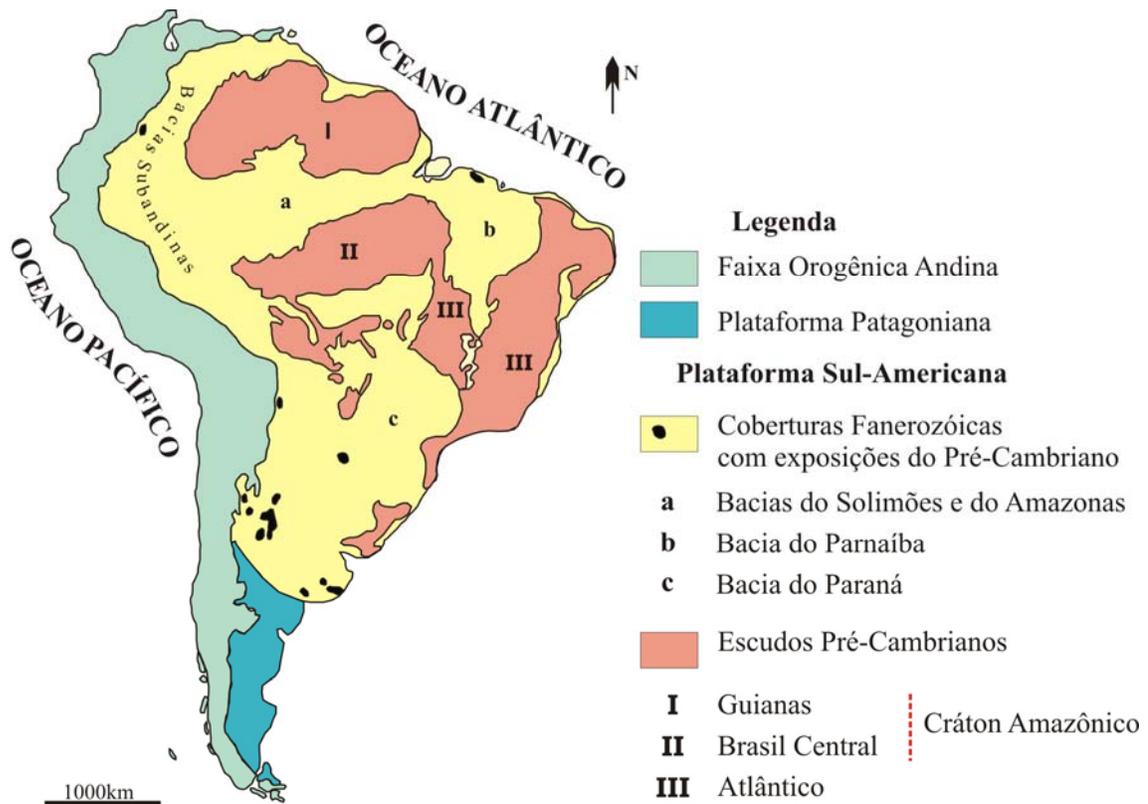


Figura 2.1 – Províncias geotectônicas da América do Sul.
Fonte: Adaptado de Cordani et al 2000 por Rosa-Costa (2006).

Segundo Santos (2003), o Escudo das Guianas e o Escudo Brasil Central, localizado respectivamente a norte e a sul da Bacia do Amazonas-Solimões, constituem o Cráton Amazônico e englobam cerca de 4.500.000 km². O Cráton localiza-se ao norte da América do Sul, incluindo parte do Brasil, Guiana Francesa, Guiana, Suriname, Venezuela, Colômbia e

Bolívia. Ele é limitado a leste, sul e sudeste por rochas geradas durante o Ciclo Orogênico Brasileiro (930–540 Ma). O Cráton ainda é coberto por diversas bacias fanerozóicas a nordeste (Maranhão), sul (Xingu e Alto Tapajós), sudoeste (Parecis), oeste (Solimões), norte (Tacutu) e centro (Amazonas).

Basicamente existem duas teorias principais para o modelo de evolução do Cráton Amazônico, o modelo geofísico-estrutural e o modelo geocronológico. O modelo geofísico-estrutural ou fixista (como também é conhecido), apresentado por Hasui, Haraly e Schobbenhaus (1984), não é muito aceito, pois levantamentos geológicos realizados nas últimas décadas com o objetivo de datação mostram que alguns blocos crustais são mais jovens que o Arqueano-Paleoproterozóico e, ainda, que acreção crustal juvenil relacionada a ambientes de subducção representou um mecanismo fundamental de crescimento continental deste Cráton (ROSA-COSTA, 2006).

O modelo geocronológico, apresentado por Tassinani e Macambira (2004), caracteriza a evolução do Cráton Amazônico como resultante de sucessivos episódios de acreção crustal no Paleo e Mesoproterozóico, em volta de um núcleo mais antigo, estabilizado no final do Arqueano (ROSA-COSTA, 2006). Este modelo é mais aceito devido à coerência com que os novos dados coletados se adaptam a sua teoria.

Segundo este modelo, o Cráton Amazônico é dividido nas seguintes províncias geocronológicas, de acordo com seus padrões litológicos e estruturais (Figura 2.2): Amazônia Central, que compreende os núcleos arqueanos Carajás e Iricoumé com idades superiores a 2,5 Ga, e as províncias Paleo e Mesoproterozóicas Maroni-Itacaiúnas (2,2 – 1,9 Ga), Ventuari-Tapajós (1,9 – 1,8 Ga), Rio Negro-Juruena (1,8 – 1,55 Ga), Rondoniana-San Ignácio (1,55 – 1,3 Ga) e Sunsás (1,25 – 1,0 Ga).

Segundo o modelo de Tassinari e Macambira (2004), a porção oriental do Escudo das Guianas está representada por uma expressiva província paleoproterozóica, denominada Província Maroni-Itacaiúnas, cuja evolução está relacionada ao Ciclo Tranzamazônico. De acordo com esta proposta, esta província é composta por extensos segmentos de rochas paleoproterozóicas, com remanescentes isolados de rochas arqueanas.

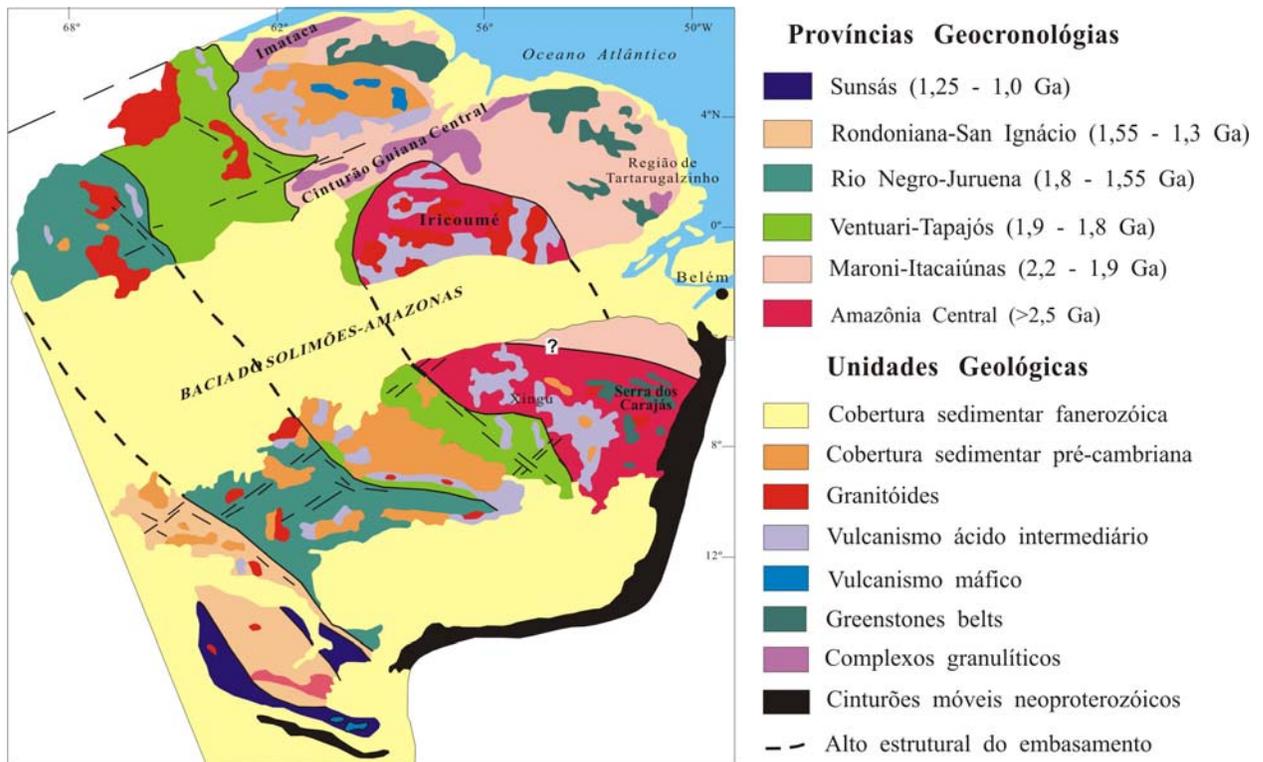


Figura 2.2 – Província geocronológica do Cráton Amazônico.
 Fonte: Adaptado de Tassinari e Macambira (2004) por Rosa-Costa (2006).

2.2 GEOLOGIA LOCAL

Em termos estruturais, no embasamento do Escudo das Guianas predomina notavelmente o *trend* NW-SE, que representa principalmente a posição de grandes cinturões de cavalgamento e zonas de cisalhamento transcorrentes, cuja evolução está relacionada ao Ciclo Transamazônico, do Paleoproterozóico (ROSA-COSTA, 2006), como mostrado na Figura 2.3. Muitas dessas zonas de cisalhamento experimentaram reativação durante o Proterozóico Médio-Superior, caracterizando-se pela alternância de eventos de fragmentação e compressão relacionados aos estágios iniciais do Ciclo de Wilson. Os demais períodos de reativação das zonas de fraqueza principais do Pré-Cambriano referem-se aos eventos tectônicos que respondem pela formação das bacias paleozóicas, mesozóicas, cenozóicas e recentes (ALMEIDA; HASUI; BRITO NEVES, 1976). De acordo com Costa et al. (1996), no leste do Amapá, as estruturas do Terciário Superior correspondem principalmente a falhas normais orientadas na direção NNW-SSE e inclinadas para ENE (Figura 2.3). Elas formam parte da arquitetura de uma bacia

assimétrica preenchida por sedimentos do Grupo Barreiras e são fortemente controladas por falhas normais mesozóicas da Bacia do Cassiporé (COSTA et al., 1996).

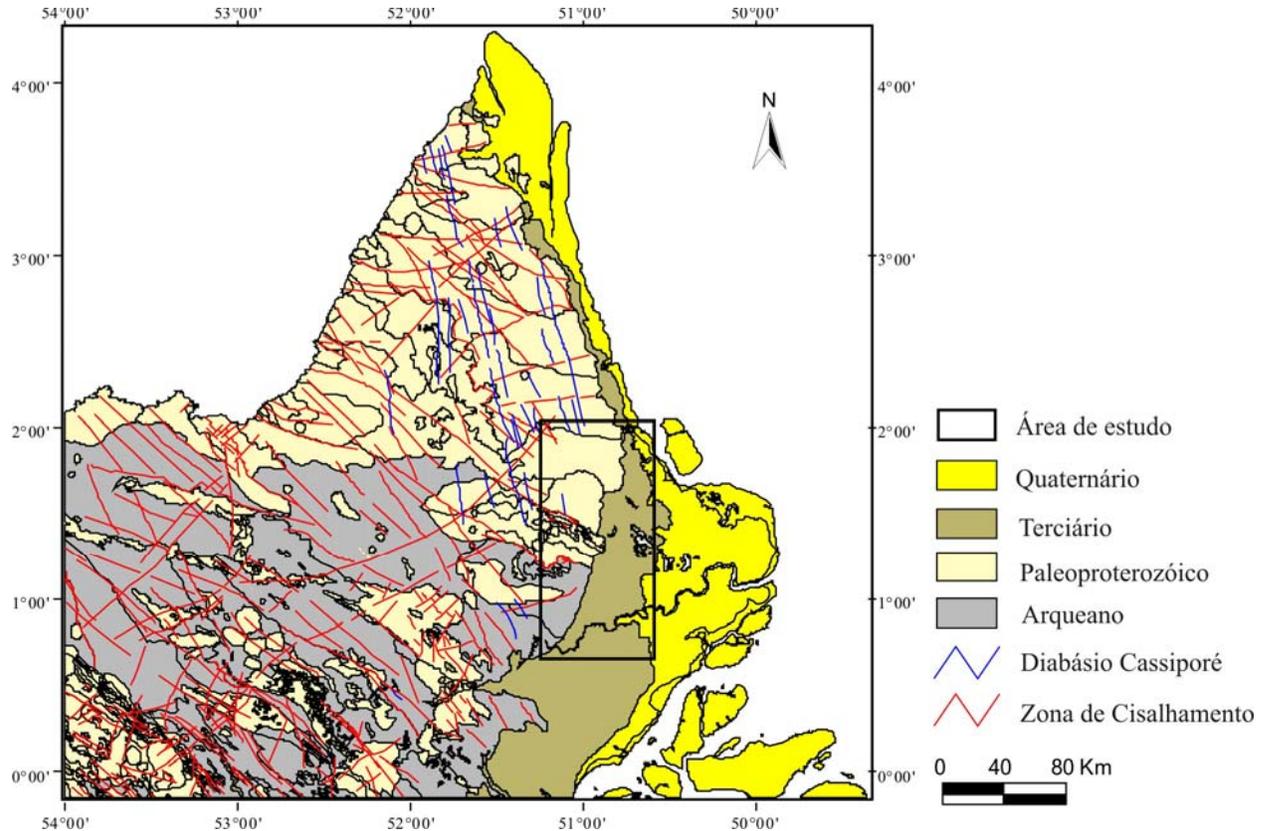


Figura 2.3 – Principais estruturas presentes na porção oriental do Escudo das Guianas, no estado do Amapá. O retângulo destaca a área de estudo enfocada nesta dissertação. Fonte: CPRM (2004).

A área de trabalho está posicionada na borda oriental do Escudo das Guianas, no domínio da Província Maroni-Itacaiúnas e inclui parte da cobertura Fanerozóica sedimentar a leste, representada pelo Grupo Barreiras (Terciário) e coberturas quaternárias subordinadas (Figura 2.3 e Figura 2.4).

O embasamento cristalino neste setor do Escudo das Guianas é composto por rochas ígneas e metamórficas de idades arqueanas e paleoproterozóicas (Figura 2.4). As unidades do embasamento possuem contatos na direção NW-SE, enquanto as rochas sedimentares do Grupo Barreiras ocorrem na área ao longo de uma faixa aproximadamente N-S, que margeia a borda oriental do Escudo das Guianas.

A cobertura sedimentar é constituída por rochas sedimentares argilosas, areno-argilosas e arenosas, submetidas a intensos processos intempéricos, dentre os quais a lixiviação do ferro, que provocam nestas rochas um aspecto mosqueado, com tonalidades amareladas, avermelhadas e esbranquiçadas (SILVEIRA; SANTOS, 2005).

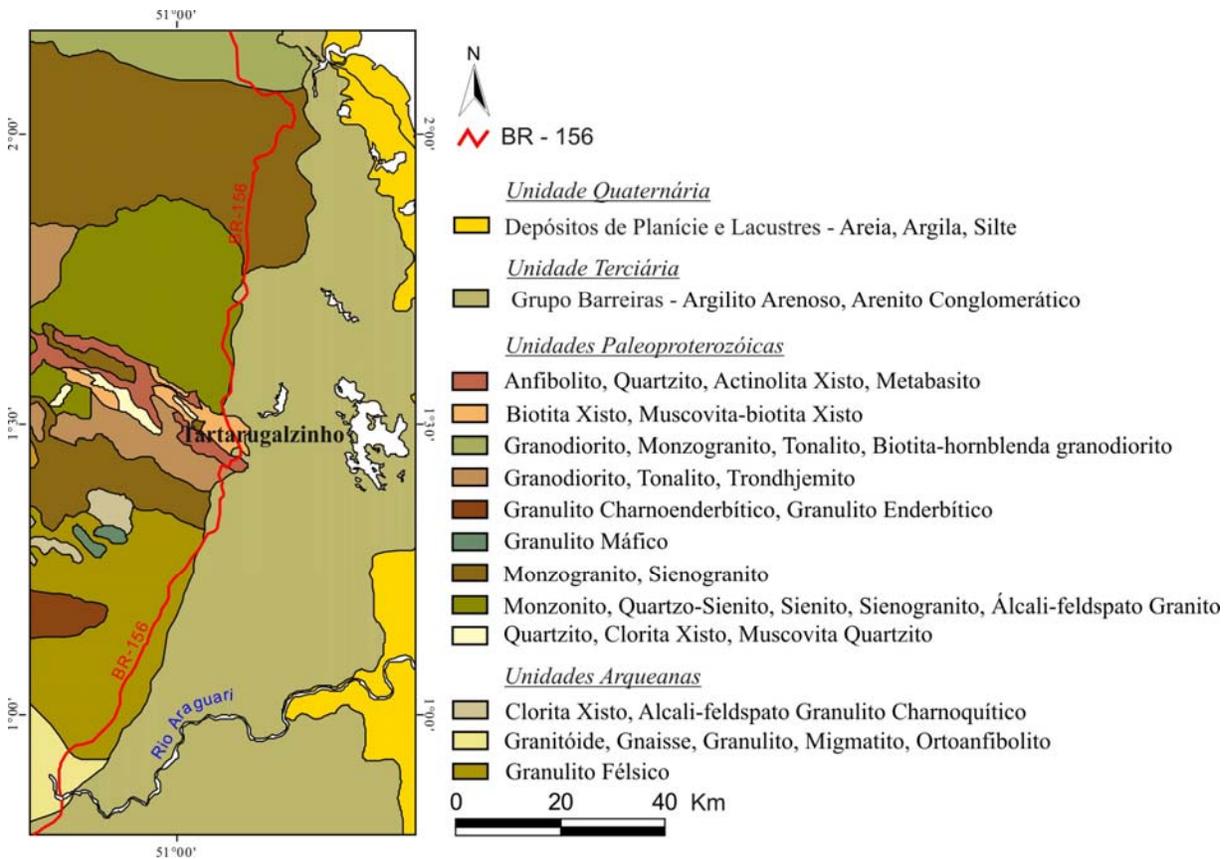


Figura 2.4 – Principais unidades litológicas da porção oriental do Escudo das Guianas. Fonte: CPRM (2004).

De acordo com Silveira e Santos (2005), a cobertura sedimentar quaternária é constituída fundamentalmente por depósitos de planície e depósitos lacustres. Os depósitos de planície são localizados em áreas planas de campo em planície costeira, caracterizada por sedimentos pelíticos (argila e silte) e por inundação parcial ou total de sua área. Os depósitos lacustres são localizados em áreas em torno dos principais lagos da região costeira, e caracterizam-se por serem ricos em matéria orgânica e sedimentos arenosos grosseiros com granocrescência ascendente típicos de canais fluviais.

3 REVISÃO DE CONCEITOS

3.1 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

3.1.1 Introdução

O Método Gravimétrico baseia-se na Lei da Gravitação Universal de Newton, expressa através da atração mútua entre as massas dos corpos e da distância que as separam.

Para a prospecção geológica, o método consiste em medir a aceleração da gravidade sobre a superfície terrestre, com o objetivo de detectar estruturas geológicas ou concentrações minerais que provoquem variações da aceleração. Essas distorções de aceleração se dão pela diferenciação de densidade abaixo da superfície terrestre.

O primeiro emprego da Gravimetria no uso da prospecção geológica foi realizado em 1902 na Hungria por Loránd Eötvös, onde foi empregada uma balança de torção desenvolvida por ele para medir horizontalmente o gradiente da aceleração da gravidade. Com o instrumento desenvolvido por Eötvös, em 1924 foram feitas medidas de gravidade no Texas, que possibilitaram a descoberta do Domo Nash, uma estrutura armazenadora de petróleo. No início dos anos 30, outro instrumento para fazer medidas da gravidade foi apresentado: o gravímetro, mais portátil, menos sensível a efeitos topográficos e que permitia fazer medidas com mais rapidez do que a balança de torção. Com o gravímetro se impulsionou a aplicação da Gravimetria para a aplicação na prospecção geológica (LUIZ; SILVA, 1995).

Os levantamentos gravimétricos na prospecção são realizados na superfície de terrenos, em poços ou em galerias de minas, áreas cobertas por água e com menos frequência levantamentos aéreos. Este método é empregado na procura de estruturas acumuladoras de óleo e gás assim como para a localização de depósitos minerais de interesse econômico (LUIZ; SILVA, 1995).

3.1.2 Teoria do Método Gravimétrico

3.1.2.1 Lei de Newton da Gravitação Universal

O método gravimétrico é regido pela lei da gravitação universal de Newton, que descreve que a força de atração entre corpos é diretamente proporcional ao produto de suas

massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o centro de suas massas. A força de atração entre duas massas é dada por:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (3.1)$$

em que F é a força de atração entre as massas m_1 e m_2 , r é a distância que separa m_1 de m_2 e G é a constante da gravitação que tem o valor $6,67 \cdot 10^{-8} \text{ dina.cm}^2 / \text{g}^2$, no sistema CGS. A aceleração com que m_1 é atraída por m_2 é adquirida dividindo a força de atração F por m_2 , resultando em:

$$a = \frac{F}{m_2} = G \frac{m_1}{r^2}. \quad (3.2)$$

Tomando M como a massa da Terra e R como a distância do seu centro até a superfície, os corpos em sua superfície serão atraídos com aceleração:

$$a = \frac{GM}{R^2}, \quad (3.3)$$

em que a massa da Terra M é igual a $5,983 \cdot 10^{27} \text{ g}$. Sendo a Terra não perfeitamente esférica (seu raio é menor nos pólos) a aceleração de atração aumenta na direção dos pólos. Como a distribuição de densidade na Terra não é perfeitamente homogênea, é mais conveniente dividi-la em elementos infinitesimais e soma-los individualmente. Assim, é conveniente substituir a equação da aceleração de atração por:

$$a = G \int_V \frac{dM}{r^2}. \quad (3.4)$$

Devido ao movimento de rotação, a Terra está sujeita a uma força centrífuga, que depende diretamente do seu raio de rotação l e sua velocidade angular ω . A aceleração centrífuga é definida por:

$$a_c = \omega^2 l. \quad (3.5)$$

Portanto um corpo localizado na superfície terrestre está sujeito a duas acelerações, a aceleração de atração e a aceleração centrífuga. Enquanto a aceleração de atração possui orientação para o centro da terra, a aceleração centrífuga possui uma componente no sentido

contrário como visto na Figura 3.1. Devido a aceleração de atração ser maior que a componente da aceleração centrífuga, o corpo é atraído para o centro da Terra com uma aceleração denominada de aceleração da gravidade, de intensidade:

$$g = G \int \frac{dM}{r^2} - \omega^2 l \cos \Phi, \quad (3.6)$$

sendo Φ a latitude onde se encontra o corpo. O raio de rotação l possui o maior valor no Equador e seu menor valor nos pólos onde se iguala a zero, com isso é fácil concluir que gravidade varia de acordo com a sua latitude sendo menor no Equador e maior nos pólos.

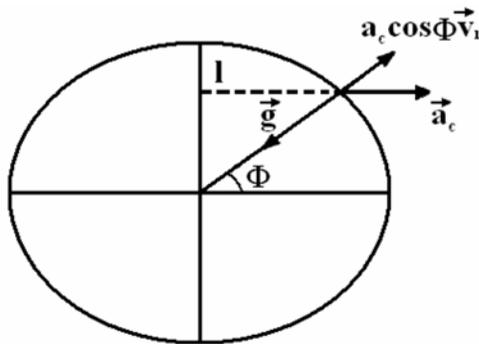


Figura 3.1 – Aceleração atuante na superfície da terra.

Os valores da gravidade são normalmente medidos no sistema CGS em cm/s^2 , denominado de Gal. Na prospecção geofísica tem-se como objetivo medir as variações dos valores da gravidade associados aos materiais geológicos, cujos valores normalmente variam na ordem de 10^{-3} a 10^{-4} Gal, pois os valores dos contrastes de densidade são muito pequenos. Por isso, na prospecção geofísica emprega-se o submúltiplo miligal (mGal).

3.1.2.2 Gravidade da Terra

Sabe-se que os valores da gravidade ao longo de sua superfície dependem de cinco fatores, que são: latitude, elevação, topografia da região, atração entre Sol e Lua (marés terrestres) e a variação da densidade em subsuperfície. Dentre eles, a densidade é o único fator que é importante para uma prospecção geológica, portanto após coletados, os dados precisam ser corrigidos, para a retirada do efeito dos outros fatores. A variação provocada pela densidade comparada com a provocada pelos outros fatores que contribuem para a gravidade é muito

menor. Por exemplo, a variação gravitacional do equador para os pólos é de aproximadamente 5 Gal ou 0,5% do valor médio da gravidade, enquanto os valores da variação devido a altitude chegam a 0,1 Gal ou 0,01% de g . Por outro lado, anomalias produzidas por estruturas ou corpos geológicos são da ordem de 0,01 Gal. Na prospecção de petróleo as anomalias chegam em torno de 10 mGal, já na prospecção mineral as anomalias são inferiores a 5 mGal. Portanto, para fazer levantamentos para a prospecção os instrumentos devem ter a sensibilidade de pelo menos 0,1 mGal (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990)

3.1.2.3 Correções da Gravidade

A fim de que os valores da gravidade medidos na prospecção geofísica reflitam apenas variações na densidade são aplicadas as seguintes correções: a correção do efeito da latitude, correção topográfica, correção de altitude, correção de marés (efeito da atração do Sol e Lua), e uma correção adicional, feita para corrigir o erro que o próprio instrumento de medida proporciona, chamada de variação instrumental ou *drift*.

3.1.2.3.1 Correção de Latitude

A correção de latitude serve para corrigir os efeitos relacionados com a variação do raio da Terra e da força centrífuga. Para aplicar esta correção é necessário estabelecer uma latitude de referência (Φ_0), para onde os valores medidos serão reduzidos, como se todas as medidas tivessem sido realizadas naquela latitude.

$$C_L = 5162,83(\text{sen}^2\Phi_1 - \text{sen}^2\Phi_0) \text{ mGal/km} \quad (3.7)$$

3.1.2.3.2 Correção de Elevação (Ar-livre)

Esta correção é feita apenas para eliminar os efeitos da altitude das medidas. Ela não leva em conta a quantidade de massa existente entre o centro da Terra e o ponto de medida (LUIZ; SILVA, 1995). A equação para o cálculo da correção é obtida através de

$$C_{AL} = 0,3086h \text{ mGal}, \quad (3.8)$$

sendo h a diferença de altitude em metros entre a medida e o nível do mar.

3.1.2.3.3 Correção Bouguer

Esta correção leva em conta a massa existente entre o centro da Terra e a estação medida, diferente da correção ar-livre descrita anteriormente onde era ignorada. Esta correção elimina o efeito da massa existente entre o nível da estação e o nível do mar. A correção é feita através da seguinte equação:

$$C_B = 0,04191\rho h \text{ mGal}, \quad (3.9)$$

em que ρ é a densidade média da massa que existe entre o nível da estação e o nível do mar.

3.1.2.3.4 Correção Topográfica ou de Terreno

Esta correção quase sempre só é aplicada em regiões com grandes desníveis topográficos (maior que 50 metros). A correção é usada para complementar a correção Bouguer, para repor massa retirada em excesso e massa não retirada (Figura 3.2). Quando o terreno tem pouco desnível esses efeitos são muito pequenos e podem ser desprezadas, não necessitando da correção topográfica.

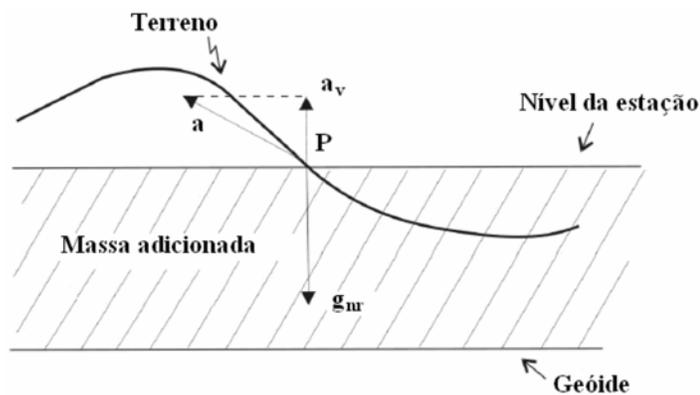


Figura 3.2 – Efeito da topografia no gravímetro.
Fonte: Adaptado de Luiz e Silva (1995).

Essa correção é aplicada computacionalmente, devido rapidez e agilidade com que os dados são processados, necessitando que os dados estejam digitalizados assim como mapas de contorno topográficos (LUIZ; SILVA, 1995).

3.1.2.3.5 Correção de Maré

Devido a mudanças de posições entre Terra, Sol e Lua, os valores de gravidade medidos pelo gravímetro podem variar ao longo do dia, com variações máximas em torno de 0,3 mGal.

Os valores das perturbações provocadas pelo Sol e a Lua podem ser calculadas teoricamente através de equações matemáticas, para qualquer hora do dia e qualquer parte do globo terrestre. Estes valores apresentam-se em tabelas ou podem ser calculados com programas de computadores.

3.1.2.3.6 Correção da Variação Instrumental

A variação instrumental é corrigida realizando-se duas medidas em um mesmo ponto (estação base), normalmente no início e no fim do dia. Em um levantamento, não é necessário que se façam as duas medidas sempre na mesma base, pois em levantamentos de áreas extensas, poderá levar muito para voltar para estação base, sendo assim, fica mais fácil estabelecer varias estações durante o levantamento para fazer estas medidas.

3.1.3 Densidade das Rochas

Entre as rochas existentes, as rochas sedimentares são as que possuem menor densidade. A densidade varia de acordo com a composição da rocha e sua porosidade. Quanto mais porosa, menos densa a rocha se torna. Entre as rochas ígneas, as extrusivas são menos densas que as intrusivas. No que diz respeito a composição, quanto mais ácida a rocha ígnea for, menos densa ela se torna. Já as rochas metamórficas variam sua densidade de acordo com o seu grau metamórfico e de acordo com a sua rocha geradora, ou seja, uma rocha metamórfica de origem sedimentar como o arenito, terá uma densidade menor que uma rocha metamórfica de origem ígnea como granito (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

3.2 RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR)

3.2.1 Introdução

O Radar de Penetração no Solo (GPR) é um método eletromagnético de investigação do subsolo não destrutivo e não invasivo, que vem sendo muito utilizado ultimamente para a investigação de camadas próximas da superfície, por ser rápido, prático, econômico e oferecer

uma alta resolução, que permite obter grandes detalhes e informações sobre feições geológicas. O GPR é utilizado também em outros tipos de investigação como, por exemplo, as voltadas para resolver problemas da Engenharia Civil.

O método produz as melhores respostas em ambientes geológicos com baixa condutividade (menos de 0,001 S/m); por isso materiais como areia e rocha cristalina são ambientes que propiciam uma maior profundidade de investigação. Já os solos ricos em argila e silte, e os solos com poros preenchidos com água com alguma salinidade, que fazem aumentar a condutividade do meio, contribuem para diminuir a profundidade de investigação (DAVIS; ANNAN, 1989).

Diferente dos outros métodos geofísicos eletromagnéticos que apenas detectam corpos metálicos bons condutores, o GPR é capaz de encontrar e caracterizar superfícies tanto metálicas, como não metálicas.

3.2.2 Histórico

A primeira atribuição do uso de um sinal eletromagnético para determinar a presença de objetos metálicos terrestres foi feita por Christian Hülsmeier em 1904 (DANIELS, 1996). Apenas seis anos depois, na Alemanha, Leimbach e Löwy descreveram seu uso para determinar a localização de objetos na subsuperfície (DANIELS, 1996). Estes autores utilizavam antenas separadas na superfície para detectar interfaces e depósitos minerais na subsuperfície.

De acordo com Daniels (1996), a partir de 1930 técnicas de pulso eletromagnético foram desenvolvidas para investigar em profundidade no gelo, água fresca, depósitos de sal, desertos e formações rochosas.

A partir da década de 80, com o desenvolvimento tecnológico, vários equipamentos foram construídos para a aquisição de dados digitais, minimizando o custo e tornando mais prático o uso do GPR. Uma grande quantidade de trabalhos científicos sobre GPR foi publicada em diversas áreas do conhecimento, como exploração mineral, geologia básica, hidrogeologia, geotecnia, planejamento urbano, geologia ambiental, arqueologia, pedologia, aplicações militares e forense (BORGES, 2007).

No Brasil, os primeiros trabalhos realizados com GPR foram feitos pelo professor William Sauck, na UFPA, na década de 90. Atualmente vem sendo utilizado como objeto de

pesquisa por diversas universidades, tais como: IAG/USP, Unesp, UnB, ON-RJ, UFRGS, UFRJ, UFC, UFBA, UFRN, entre outras (BORGES, 2007).

3.2.3 Teoria do Método GPR

3.2.3.1 Princípio de Funcionamento

No GPR, um pulso de onda eletromagnética de alta frequência (10MHz - 2500 MHz) é transmitido ao solo por meio de uma antena transmissora. Este pulso se propaga pelo meio, sendo parte da energia refletida e outra transmitida sempre que ocorrem variações nas propriedades eletromagnéticas do meio (condutividade, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética). A parte que refrata eventualmente pode ser refletida novamente e parte dela refratada e assim sucessivamente até que toda a onda seja dissipada (Figura 3.3).

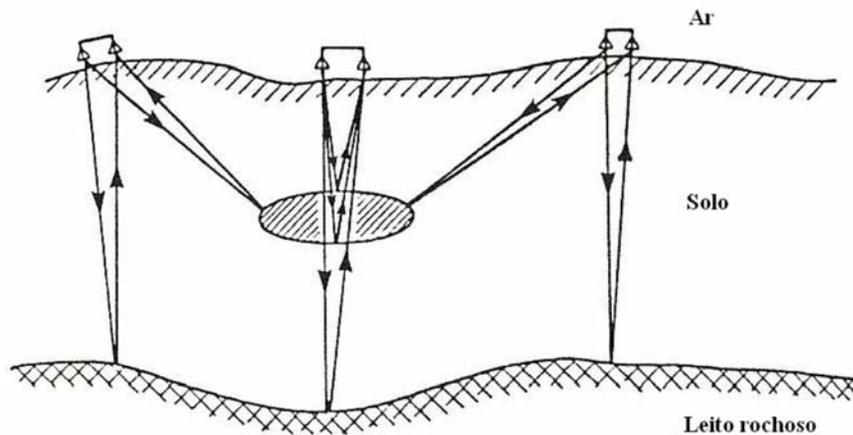


Figura 3.3 – Ilustração conceitual do GPR sendo usado em um perfil do solo acima do leito rochoso. Fonte: Adaptado de Davis e Annan (1989).

O pulso refletido é recebido em uma antena receptora e registrado gerando uma curva de *amplitude x tempo* (Figura 3.4). A profundidade de investigação depende, como em todos os métodos eletromagnéticos, da frequência do sinal emitido e das propriedades eletromagnéticas do meio (DAVIS; ANNAN, 1989).

A velocidade de propagação da onda eletromagnética depende da condutividade, da permissividade dielétrica e da permeabilidade magnética dos materiais. Para o GPR, a velocidade depende apenas a permissividade dielétrica, como aponta a equação 3.10. A Tabela 3.1 mostra alguns valores de condutividade e velocidade, para diversos tipos de materiais.

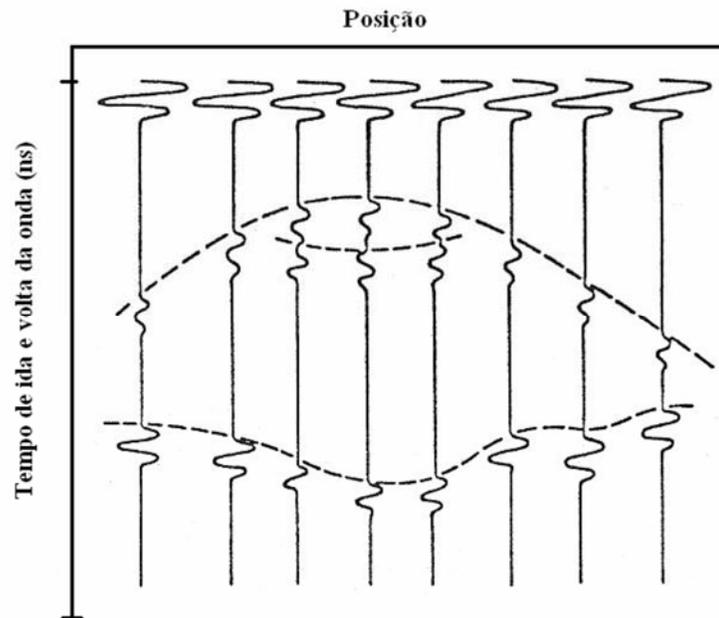


Figura 3.4 – Radargrama, mostrando os registros de reflexão obtidos no perfil da Figura 3.3.
Fonte: Adaptado de Davis e Annan (1989).

Tabela 3.1 – Constante dielétrica (ϵ_r), condutividade elétrica (σ) e velocidade de propagação do pulso de GPR em materiais comuns nas frequências utilizadas pelo GPR.

| <i>Material</i> | ϵ_r | $\sigma(mS/m)$ | $v(m/ns)$ | <i>Material</i> | ϵ_r | $\sigma(mS/m)$ | $v(m/ns)$ |
|--------------------------------|--------------|----------------|-----------|-------------------------------|--------------|----------------|-----------|
| <i>Ar</i> | 1 | 0 | 0,3 | <i>Água destilada</i> | 81 | 0,01 | 0,03 |
| <i>Areia seca e cascalho</i> | 2-6 | 0,01 | 0,1-0,2 | <i>Água fresca</i> | 81 | 0,5 | 0,03 |
| <i>Argila seca</i> | 5 | 2 | 0,1 | <i>Água do mar</i> | 81 | 3000 | 0,03 |
| <i>Folhelho e siltito seco</i> | 5 | 1 | 0,1 | <i>Areia saturada</i> | 20-30 | 0,1-1 | 0,05-0,07 |
| <i>Calcário seco</i> | 4 | 0,5 | 0,15 | <i>Silte saturado</i> | 10 | 1-10 | 0,09 |
| <i>Solo arenoso seco</i> | 2,6 | 0,14 | 0,18 | <i>Argila saturada</i> | 40 | 1000 | 0,04 |
| <i>Solo argiloso seco</i> | 2,4 | 0,27 | 0,19 | <i>Solo arenoso saturado</i> | 25 | 6,9 | 0,06 |
| <i>Sal seco</i> | 5-6 | 0,01-1 | 0,1-0,12 | <i>Solo argiloso saturado</i> | 15 | 50 | 0,04 |
| <i>Granito seco</i> | 5 | 0,01 | 0,1 | <i>Arenito saturado</i> | 20-30 | 40 | 0,05-0,07 |
| <i>Basalto seco</i> | 6 | 1 | 0,1 | <i>Siltito saturado</i> | 30 | 100 | 0,05 |
| <i>Diabásio seco</i> | 7 | 10 | 0,1 | <i>Folhelho saturado</i> | 7 | 100 | 0,1 |
| <i>Ferro</i> | 1 | 10^9 | 0,3 | <i>Calcário saturado</i> | 8 | 2 | 0,1 |
| <i>Aço</i> | 1 | ∞ | 0,3 | <i>Granito saturado</i> | 7 | 1 | 0,1 |
| <i>PVC</i> | 8 | 0 | 0,1-0,17 | <i>Basalto saturado</i> | 8 | 10 | 0,1 |
| <i>Asfalto</i> | 3-5 | 0 | 0,1-0,12 | <i>Diabásio saturado</i> | 8 | 100 | 0,1 |
| <i>Concreto seco</i> | 5,5 | 0 | 0,13 | <i>Concreto saturado</i> | 12,5 | 0 | 0,08 |

Fonte: Adaptado de Davis e Annan (1989) por Melo (2007).

A Figura 3.5 mostra um gráfico que ilustra a relação da velocidade com a frequência e a condutividade. Observa-se na figura que a velocidade permanece constante entre 10^6 Hz (1 MHz) e 10^9 Hz (1000 MHz) para condutividades inferiores a 1000 mS/m. A partir de 1000 MHz a velocidade aumenta, devido a relaxação das moléculas da água (DAVIS; ANNAN, 1989). Por este motivo, normalmente se opera o GPR com frequências entre 10 MHz a 1000 MHz, onde a velocidade permanece basicamente constante e o sinal eletromagnético não é dispersado.

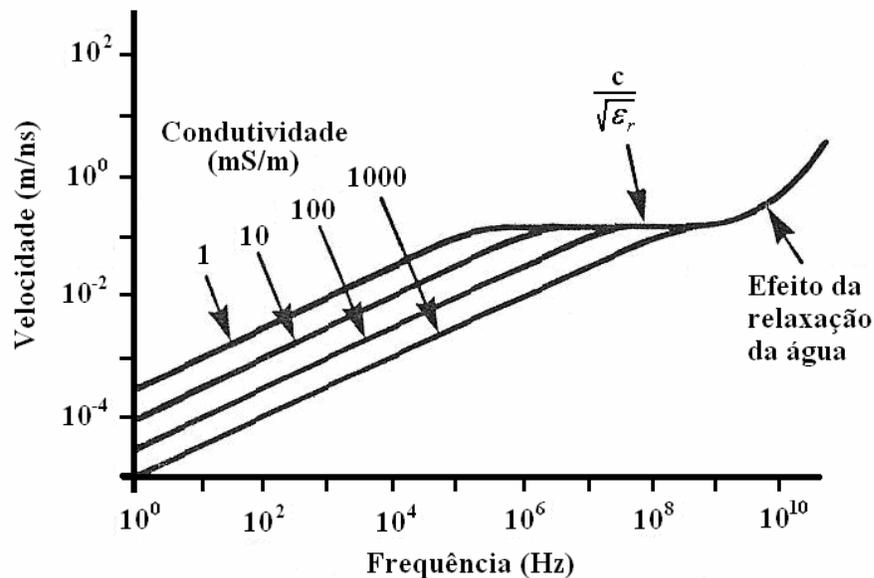


Figura 3.5 – Relação entre velocidade e frequência para várias condutividades.
Fonte: Adaptado de Davis e Annan (1989).

Após serem coletados, os dados de GPR passam por um processamento a fim de que se obtenha uma melhor imagem da subsuperfície. Devido a similaridade com os dados sísmicos várias etapas do processamento sísmico têm sido utilizadas no processamento dos dados de GPR (PESTANA; BOTELHO, 1997).

3.2.3.2 Teoria Eletromagnética

Como os outros métodos eletromagnéticos de investigação do solo, o GPR também é regido pelas equações de Maxwell. Experimentalmente, todos os fenômenos eletromagnéticos devem obedecer às equações de Maxwell descritas no domínio do tempo como:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (3.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (3.12)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (3.13)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.14)$$

em que ρ é a densidade volumétrica de carga elétrica (C/m^3), \vec{E} é a intensidade do campo elétrico (V/m), \vec{H} é a intensidade do campo magnético (A/m), \vec{D} é a densidade de fluxo elétrico (C/m^2), \vec{B} é a densidade de fluxo magnético (Wb/m² ou Tesla) e \vec{J} é densidade de corrente elétrica (A/m²).

As equações diferenciais de Maxwell são acopladas através de relações constitutivas. As relações constitutivas são necessárias para se quantificar as propriedades físicas do meio por onde a onda eletromagnética passa (WARD; HOHMANN, 1987).

A primeira relação constitutiva é conhecida como Lei de Ohm, que relaciona a densidade de corrente elétrica (\vec{J}) à intensidade do campo elétrico (\vec{E}), expressa em:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (3.15)$$

sendo σ a propriedade do meio chamada condutividade elétrica, expressa em Siemens por metro (S/m). A condutividade elétrica é o inverso da resistividade elétrica.

A segunda relação constitutiva faz uma relação entre o campo elétrico (\vec{E}) e a densidade de fluxo elétrico (\vec{D}), representada por:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad (3.16)$$

em que ε é uma outra propriedade do meio chamada de permissividade dielétrica expressa em Faraday por metro (F/m). A permissividade dielétrica no vácuo é $8,85419 \times 10^{-12}$ F/m. Normalmente se utiliza a permissividade relativa (ε_r) ou constante dielétrica, que é a razão entre a permissividade do meio (ε) e a permissividade no vácuo (ε_0)

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, \quad (3.17)$$

A terceira equação constitutiva é uma relação entre o campo magnético (\vec{H}) e a densidade de fluxo magnético (\vec{B}) expressa por:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (3.18)$$

sendo μ a propriedade do meio denominada permeabilidade magnética. Segundo Keller (1987), em grande parte das aplicações a permeabilidade magnética dos meios pode ser considerada igual a do vácuo $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m (Henry por metro). Normalmente somente quando o meio contém elevadas quantidades de minerais magnéticos, esta aproximação não é válida.

Partindo das equações de Maxwell e fazendo uma manipulação com as relações constitutivas, obtém-se a equação de onda para o campo elétrico, que é dada por:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad (3.19)$$

sendo k o número de onda, que é o parâmetro que contém as propriedades eletromagnéticas das rochas (condutividade, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética), definido por:

$$k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - i \omega \mu \sigma, \quad (3.20)$$

sendo $\omega = 2\pi f$ (f é a frequência). Como o GPR trabalha com altas frequências, o primeiro termo da equação 3.20 torna-se significativo e não pode ser desprezado como nos outros métodos eletromagnéticos de baixa frequência (< 20.000 Hz).

Considerando um meio homogêneo e uniforme e assumindo que o campo elétrico (\vec{E}) e o campo magnético variam harmonicamente, a solução da equação de onda para o campo magnético é dada por:

$$E = E_0 e^{i(\omega t - \alpha z)} e^{-\beta z}, \quad (3.21)$$

em que E_0 é o máximo valor da amplitude da onda, z é a profundidade e α (constante de propagação) e β (constante de atenuação) são os termos que reúnem as propriedades eletromagnéticas do meio, definidos por (WARD; HOHMANN, 1987):

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (3.22)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu\epsilon}{2} \left[(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}, \quad (3.23)$$

em que $\operatorname{tg} \delta = \sigma / \omega\epsilon$ é denominado de tangente ou fator de perda. Observa-se que a primeira exponencial é a responsável pela propagação da onda enquanto a segunda exponencial é responsável pela sua atenuação (DANIELS, 1996).

A velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio é dada por (DANIELS, 1996):

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma / \omega\epsilon)^2}}{2}}}, \quad (3.24)$$

em que c_0 é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) e $\mu_r = \mu / \mu_0$. Como o GPR somente produz bons resultados em meios com valores baixos de condutividade e trabalha com frequências muito elevadas, o fator de perda é próximo de zero. Assumindo que μ_r tem valor unitário (meios não magnéticos), a expressão da velocidade da onda eletromagnética se reduz a:

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (3.25)$$

Quando a onda eletromagnética se propaga no meio e encontra discontinuidades elétricas, magnéticas ou condutivas ela sofre sucessivas reflexões e refrações, como já descrito anteriormente. A quantidade de energia eletromagnética refletida é proporcional à magnitude das mudanças eletromagnéticas do meio, esta quantidade de onda refletida é controlada pelo coeficiente de reflexão:

$$CR = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (3.26)$$

sendo Z a impedância intrínseca dos meios, com os índices 1 e 2 referindo-se a dois meios separados por uma interface.

A impedância intrínseca de um meio é definida por (ANNAN, 2001):

$$Z = \frac{\sqrt{i\omega\mu}}{\sqrt{\sigma + i\omega\varepsilon}}, \quad (3.27)$$

sendo comumente simplificada para:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}, \quad (3.28)$$

nas aplicações com GPR, que necessita de condutividades muito baixas e emprega frequências elevadas. Nestas circunstâncias o coeficiente de reflexão pode ser expresso da seguinte maneira:

$$CR = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}}. \quad (3.29)$$

A profundidade de investigação e a resolução do GPR dependem da frequência da antena. Quanto maior a frequência, menor a profundidade de investigação e melhor a resolução da imagem.

3.2.4 Operação com GPR

O instrumento do GPR pode ser constituído de um gerador de sinal e uma única antena, para transmitir e receber, constituindo o chamado modo mono-estático ou possuir duas antenas (uma transmite, a outra recebe) que é chamado modo bi-estático.

As técnicas de aquisição de dados são divididas basicamente em três tipos: perfis de reflexão com afastamento constante, sondagem de velocidade e modo de transiluminação ou tomografia.

3.2.4.1 Perfis de Reflexão com Afastamento Constante

Nesta técnica, realizada no modo bi-estático, a separação entre transmissor e receptor é mantida constante enquanto as antenas são deslocadas ao longo do perfil (Figura 3.6). O resultado gera uma imagem em que no eixo horizontal é marcada a posição das medidas e no eixo vertical o tempo de ida e volta da onda eletromagnética (Figura 3.4).

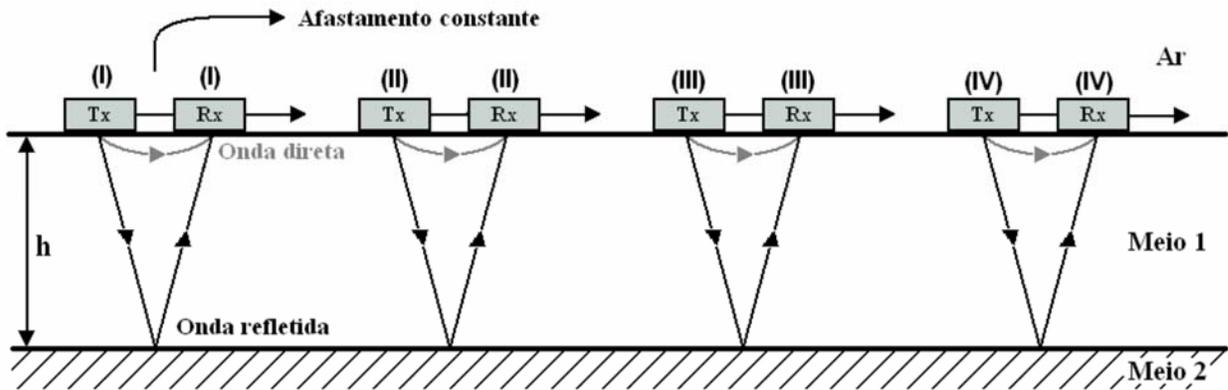


Figura 3.6 – Modo de aquisição de afastamento constante.
Fonte: Adaptado de Reynolds (1997).

3.2.4.2 Sondagem de Velocidade

Esta técnica é normalmente utilizada para estimar a velocidade da onda no meio e verificar se o refletor é uma superfície de reflexão ou apenas o resultado de interferências. As formas mais comuns de sondagem de velocidade são a WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*) e a CMP (*Common Mid Point*). Na técnica WARR uma das antenas é mantida fixa (normalmente a antena transmissora), enquanto a outra antena move-se ao longo do perfil (Figura 3.7). Na técnica CMP ambas as antenas são móveis, porém elas se movimentam em sentidos opostos em relação a um ponto fixo (Figura 3.8).

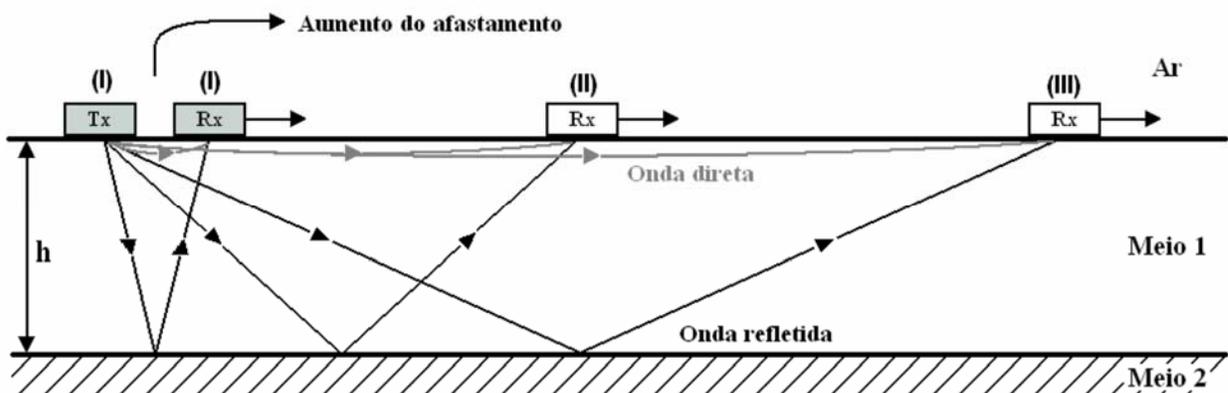


Figura 3.7 – Modo de aquisição de dados WARR.
Fonte: Adaptado de Reynolds (1997).

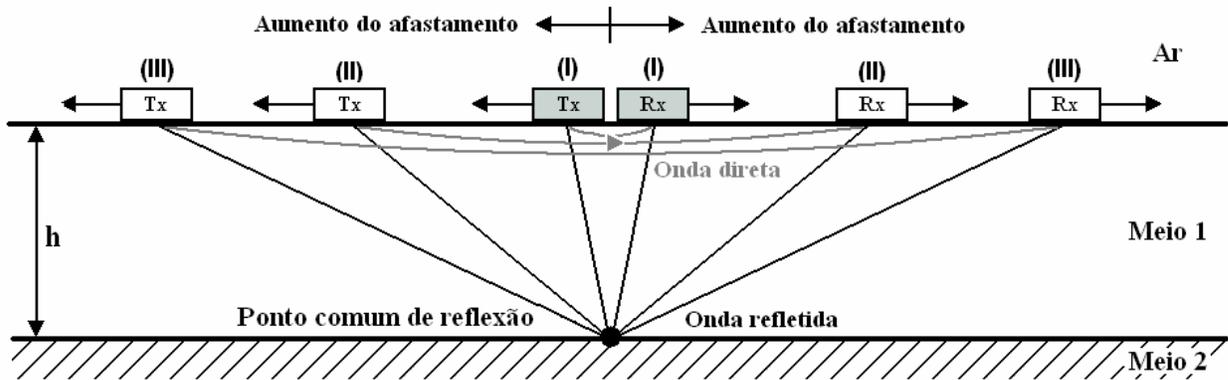


Figura 3.8 – Modo de aquisição de dados CMP.

Fonte: Adaptado de Reynolds (1997).

3.2.4.3 Modo de Transiluminação ou Tomografia

Esta técnica consiste em colocar antenas em lados opostos de um meio de investigação. Este método é muito usado em poços, onde as antenas (transmissor e receptor) ficam em poços separados (Figura 3.9). Também usado em minas onde a antena transmissora fica em uma galeria enquanto a antena receptora em uma outra galeria adjacente (Figura 3.10). Esta técnica também pode ser utilizada para encontrar fraturas em pilares de concreto, neste caso as antenas ficam em lados opostos do pilar (Figura 3.11).

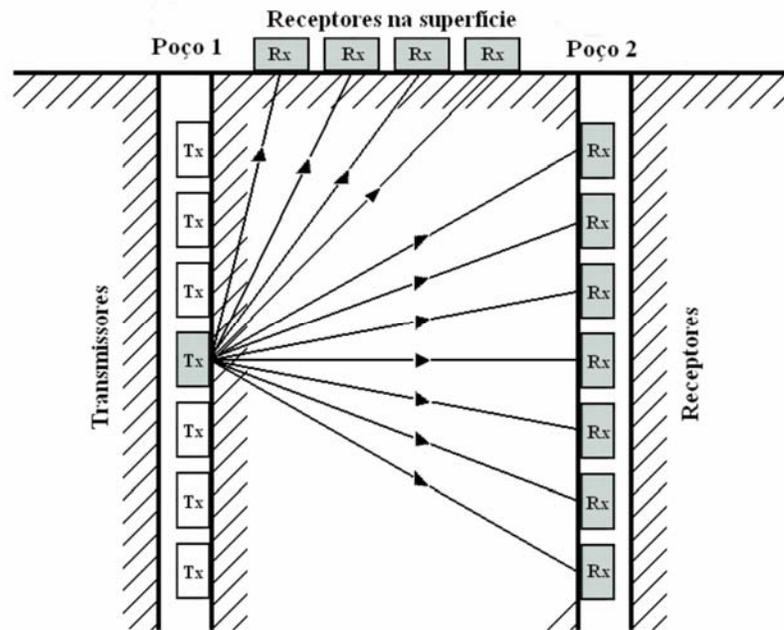


Figura 3.9 – Transiluminação poço a poço e poço superfície.

Fonte: Adaptado de Reynolds (1997).

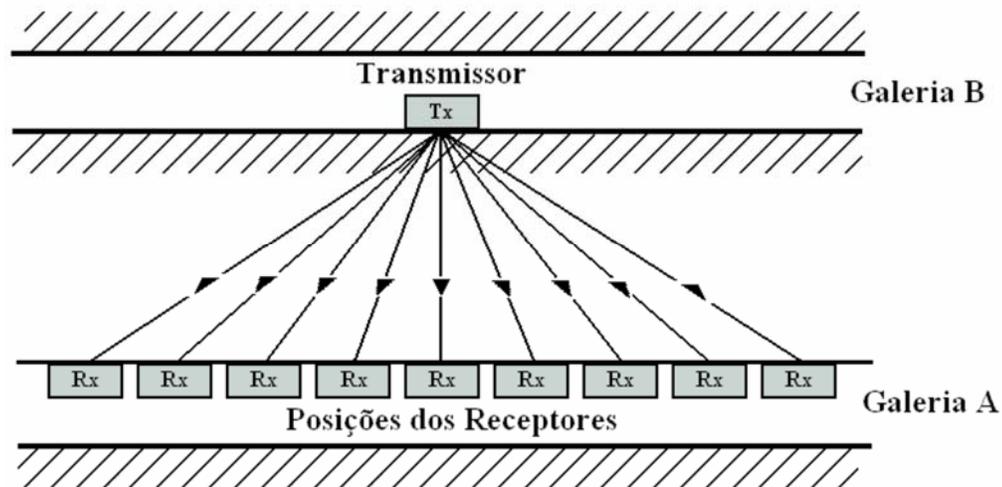


Figura 3.10 – Transiluminação utilizada em galerias de minas.
Fonte: Adaptado de Reynolds (1997).

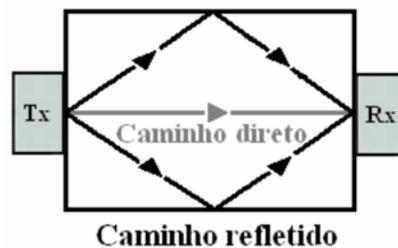


Figura 3.11 – Transiluminação utilizada para encontrar fraturas em concreto.
Fonte: Adaptado de Reynolds (1997).

3.2.5 Processamento dos Dados

Ao se propagarem na subsuperfície as ondas emitidas pelo GPR interagem com o meio sofrendo perdas causadas por espalhamento e atenuação. As perdas influenciam no sinal registrado, escondendo ou modificando a forma das estruturas enterradas. Além desses efeitos, é comum haver saturação do registro pelas grandes amplitudes das ondas aéreas e diretas, que escondem os sinais provenientes das reflexões e refrações. Esse tipo de interferência, denominada de “wow”, concentra-se em frequências muito baixas, próximas de zero (LUIZ, 1998).

Apesar das antenas usadas no GPR serem de monofrequências, caracterizadas por uma frequência central (exemplo: 400 MHz e 200 MHz), a interação do pulso com o meio produz um espalhamento de frequências, cujos sinais podem esconder algumas das feições da subsuperfície (LUIZ, 1998).

Para minimizar os efeitos citados, faz-se necessário utilizarem-se métodos numéricos para processar os dados e assim melhorar as imagens obtidas com o GPR (LUIZ, 1998).

Antes de iniciar o processamento, os dados passam por uma etapa de pré-processamento, que pode envolver modificações do cabeçalho, retirada de *scans* ruins e redistribuição de *scans* para obter uma escala horizontal constante. Algumas das etapas do processamento são descritas a seguir.

Correção de tempo zero: Permite que se elimine o registro das ondas diretas fazendo com que o zero do perfil coincida com a superfície do terreno.

Filtros: Os filtros permitem que se eliminem frequências indesejáveis, que escondem feições importantes. Existe uma variedade de filtros que podem ser aplicados no perfil, cada um possui certa finalidade, dependendo de qual problema está sendo investigado, ou que feições precisam ser destacadas.

Ganho: Aplica-se um ganho para realçar os refletores e difratores de baixa amplitude que ocorrem em maiores profundidades e normalmente desaparecem por causa da atenuação da onda eletromagnética.

Migração: Esta etapa do processamento consiste em posicionar os refletores em sua posição real e colapsar em pontos as superfícies de difração.

Conversão de tempo em profundidade: Para converter o tempo em profundidade é necessário primeiramente calcular a velocidade com que a onda se propaga no meio. Normalmente para o cálculo da velocidade, utilizam-se as técnicas CMP ou WARR, entretanto em alguns casos a análise de velocidade é feita através de hipérbolas no registro.

Em um levantamento com o GPR é importante que se obtenham informações sobre a área do trabalho, como por exemplo, mapas cartográficos e mapas geológicos a fim de saber o que se deve esperar das imagens do GPR e assim aplicar a melhor sequência de processamento.

4 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

Este trabalho foi realizado ao longo da BR-156 do estado do Amapá, na região do município de Tartarugalzinho e adjacências, vista na Figura 2.4, no capítulo 2. No trabalho foram usados dois métodos geofísicos: o método gravimétrico e o método eletromagnético Radar de Penetração no Solo (GPR). Após a coleta dos dados, foram confeccionados mapas de localização com o programa ArcView e em seguida tratados com o programa CorelDRAW, indicando onde foram adquiridos os dados de gravimetria e de GPR. Os dados com os posicionamentos das medidas estão disponíveis nos Anexos A e B.

4.1 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

O método gravimétrico foi usado para detectar discontinuidades no embasamento. As medidas gravimétricas foram realizadas com o gravímetro Lacoste–Romberg, modelo G (Figura 4.1). Nos locais de medidas foi determinado o posicionamento das coordenadas geográficas e a altitude das estações usando GPS.



Figura 4.1 – Medida gravimétrica na estação base em Tartarugalzinho.

O espaçamento das medidas gravimétricas foi de 1 km, próximo ao centro de Tartarugalzinho, e de 2 km em sua periferia. O espaçamento menor foi usado por se esperar um

espaçamento mais reduzido entre as discontinuidades geológicas próximas ao centro de Tartarugalzinho, conforme informações fornecidas pelo mapeamento geológico.

As medidas foram referidas a uma estação base estabelecida no RN 1635 L, localizado em um posto médico em Tartarugalzinho, nas coordenadas geográficas de latitude $01^{\circ} 30' 34''$ N e longitude $50^{\circ} 54' 58''$ W, e projeção UTM 166.846 (N) e 509.320 (E).

No processamento dos dados gravimétricos, as correções aplicadas foram: a correção de latitude, de altitude, Bouguer, de maré e da variação instrumental, não sendo necessária a aplicação da correção topográfica, pois o terreno possui pouco desnível.

4.2 MÉTODO GPR

Os perfis de GPR foram executados em locais indicados a partir de informação fornecida pela geologia, a fim de descobrir a natureza dos contatos entre o embasamento e sedimentos. O sistema usado para a aquisição dos perfis foi o SIR-3000 da GSSI, com antenas de 200 MHz (Figura 4.2). As medidas foram tomadas no modo tempo, com o posicionamento controlado pela inserção de marcas no registro a intervalos variando entre 25 e 60 m.



Figura 4.2 – Operação de medidas com o GPR.

O processamento dos dados de GPR foi realizado com o programa Reflex-Win 4.2 da Sandmeier Software e consistiram das seguintes etapas: (1) estabelecimento de zero (correção

estática), (2) interpolação das marcas de posicionamento, (3) aplicação de filtro 1d (DEWOW) com o parâmetro do tempo de janela de 6 ns, (4) aplicação de filtro passa banda, com as frequências de corte menores de 100 MHz e maiores de 400 Mhz, (5) aplicação de filtro remoção do *background*, (6) aplicação de filtro de média móvel com média de 4 traços, (7) aplicação de ganho manual, e (8) conversão de tempo em profundidade usando a velocidade 0,09 m/ns obtida através da análise de hipérboles. Apenas em dois perfis (perfis 3 e 4) não foi aplicado o filtro de média móvel, em seu lugar foi aplicado a migração *stack* com a velocidade constante de 0,09 m/ns, obtida pelo método das hipérboles.

A interpretação dos dados é apresentada no próximo capítulo e está dividida em duas partes: (1) interpretação dos dados de gravimetria usando modelagem direta realizada através do programa GMulti 1.0; e (2) interpretação dos dados de GPR através da análise dos padrões de reflexão nas imagens geradas pelo programa Reflex-Win 4.2 e correlação com observações feitas ao longo de cortes de estrada.

5 INTERPRETAÇÃO E RESULTADOS

5.1 GRAVIMETRIA

As medidas gravimétricas foram realizadas ao longo da BR-156 (Figura 5.1). Essas medidas foram referenciadas a uma base localizada em Tartarugalzinho. As posições das estações de medidas ao longo da estrada foram projetadas para uma reta obtida através de regressão linear (Figura 5.1), com a finalidade de facilitar a visualização dos dados na forma de perfil.

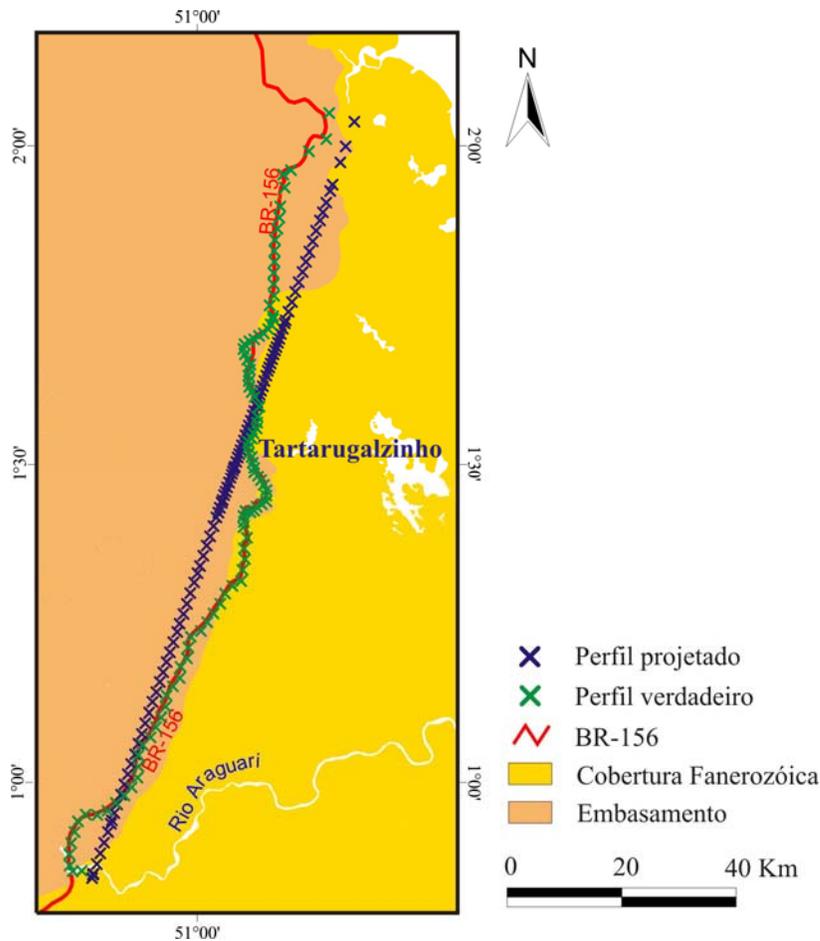


Figura 5.1 – Posição das medidas gravimétricas ao longo da BR-156 (em verde) e reta de projeção (em azul escuro).

A anomalia Bouguer está representada, no perfil projetado, na Figura 5.2-A. Observa-se no perfil uma variação de aproximadamente 40 miligals. Como o perfil foi realizado próximo ao contato entre o embasamento (a oeste) e rochas sedimentares do Terciário (a leste), tal variação é exagerada para ser causada pela mudança de litologia observada em superfície. A causa dessa

variação gravimétrica deve estar, portanto, relacionada a uma fonte profunda, podendo ser a intrusão de uma rocha mais densa ou mesmo uma região mais fina da crosta, fazendo com que o manto esteja mais próximo da superfície.

A existência de granulitos nas regiões de maior amplitude da anomalia Bouguer (entre as posições de 0 e 64 km e entre 120 e 140 km do perfil projetado), que são rochas formadas sob condições de elevadas temperaturas e pressões, sugere que o manto esteja mais próximo da superfície como opção plausível. Esta possibilidade é confirmada por estudos recentes no Escudo das Guianas, que mostraram que é possível o manto estar mais próximo da superfície naquela região. Por exemplo, Delor et al. (2003) e Roeber et al. (2003) realizaram estudos geológicos na região da Guiana Francesa e encontraram rochas de alto grau metamórfico, formadas em condições de altas temperaturas, que requer uma perturbação térmica proveniente do manto em uma zona de estiramento crustal. Também, Oliveira, Neto e Barbosa (2003), realizaram um estudo gravimétrico, na costa do estado do Amapá, e encontraram um resultado similar ao encontrado no presente trabalho, sugerindo uma região mais fina na crosta.

Na Figura 5.2-A observam-se: (1) os valores da gravidade medidos em campo, representados pelo símbolo + em preto; e (2) os valores de gravidade calculados (linha contínua em verde) para o modelo representado na Figura 5.2-B. A semelhança entre os valores medidos e calculados observados na Figura 5.2-A indicam que o modelo é uma possível representação geológica da área de estudo. Como se observa, o modelo interpretativo apresenta um afinamento da crosta em direção à extremidade SW do perfil.

Na Figura 5.2-B, o modelo foi construído usando o algoritmo 2D de Talwani (TALWANI; WORZEL; LANDISMAN, 1959), implementado no programa GMulti 1.0 desenvolvido pelo professor João Batista Corrêa da Silva da Universidade Federal do Pará e seu orientando Williams Almeida Lima.

O modelo é composto por seções poligonais que representam a crosta superior, a crosta inferior e o manto. Os valores de densidade, em cada seção poligonal, foram mantidos constantes. Esses valores foram adquiridos do trabalho de Robertson (1966). Os polígonos foram expandidos lateralmente além dos limites do perfil, a fim de se eliminar o efeito de borda nos resultados.

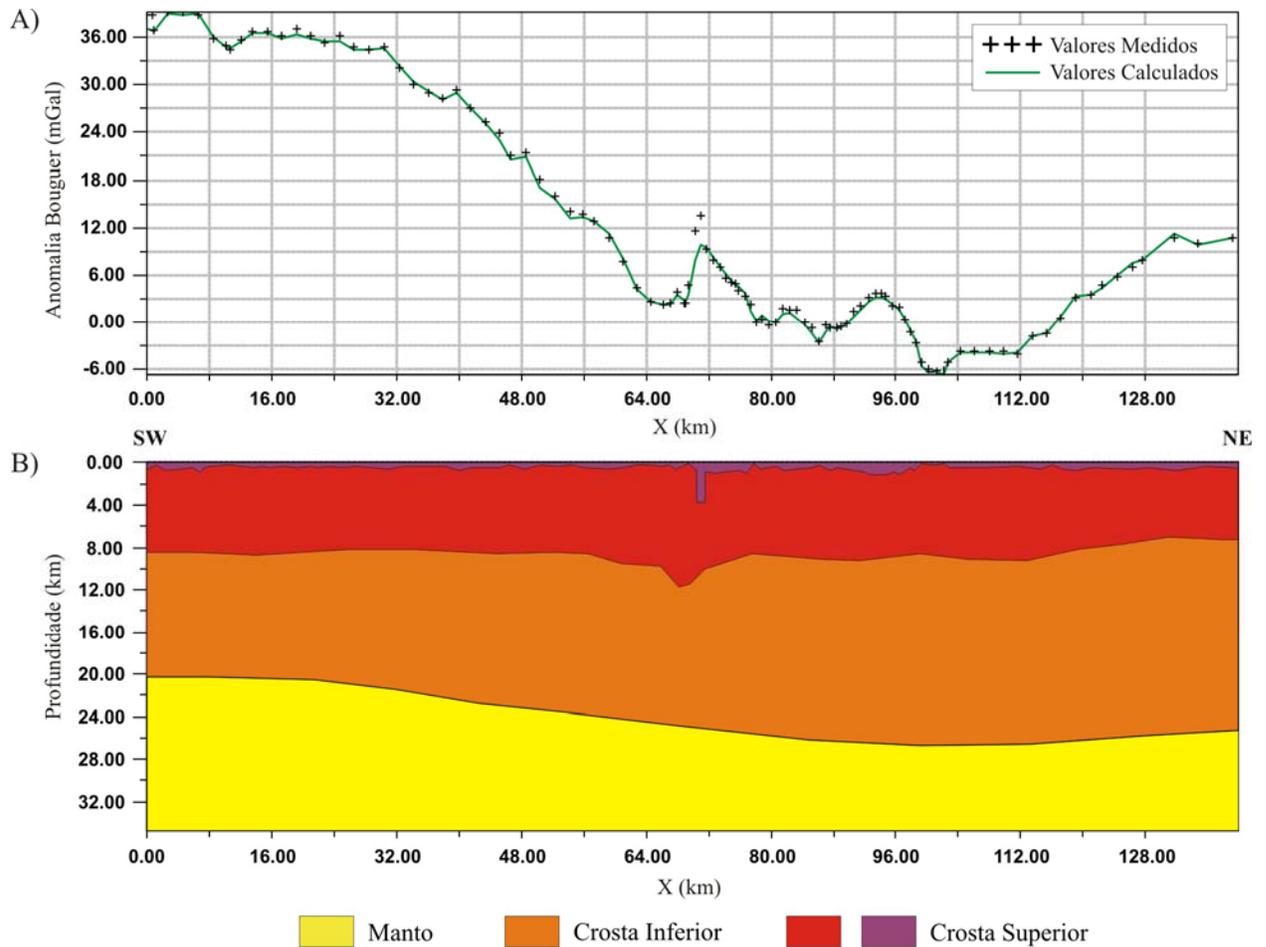


Figura 5.2 – (A) Perfil dos valores medidos e calculados da anomalia Bouguer. (B) Modelo interpretativo para a Crosta e Manto. Em amarelo o manto com densidade de 3.2 g/cm^3 , em laranja a crosta inferior com densidade de 2.9 g/cm^3 e em vermelho e roxo a crosta superior com densidades de 2.6 g/cm^3 (vermelho) e 2.9 g/cm^3 (roxo) respectivamente.

No modelo representado na Figura 5.2-B, o manto superior (em amarelo) apresenta uma densidade de 3.2 g/cm^3 e tem a profundidade do seu topo variando de cerca de 20 km a cerca de 27 km. A crosta inferior (em laranja) tem densidade de 2.9 g/cm^3 e possui uma espessura que varia de 12 km a 18 km. A crosta superior está dividida em duas partes, em vermelho a crosta possui uma densidade de 2.6 g/cm^3 e espessura média de 8 km e, em roxo, a crosta possui a densidade igual a da crosta inferior de 2.9 g/cm^3 com uma espessura inferior a 1 km.

Entre os quilômetros 78 e 118 do perfil projetado, as medidas gravimétricas foram feitas ora sobre o embadamento, ora sobre rochas sedimentares, sugerindo a possibilidade dos valores gravimétricos medidos terem recebido contribuição apreciável de bacias sedimentares. Por este

motivo, foi feita uma modelagem desse trecho numa tentativa de visualizar a contribuição das rochas sedimentares no perfil (Figura 5.3).

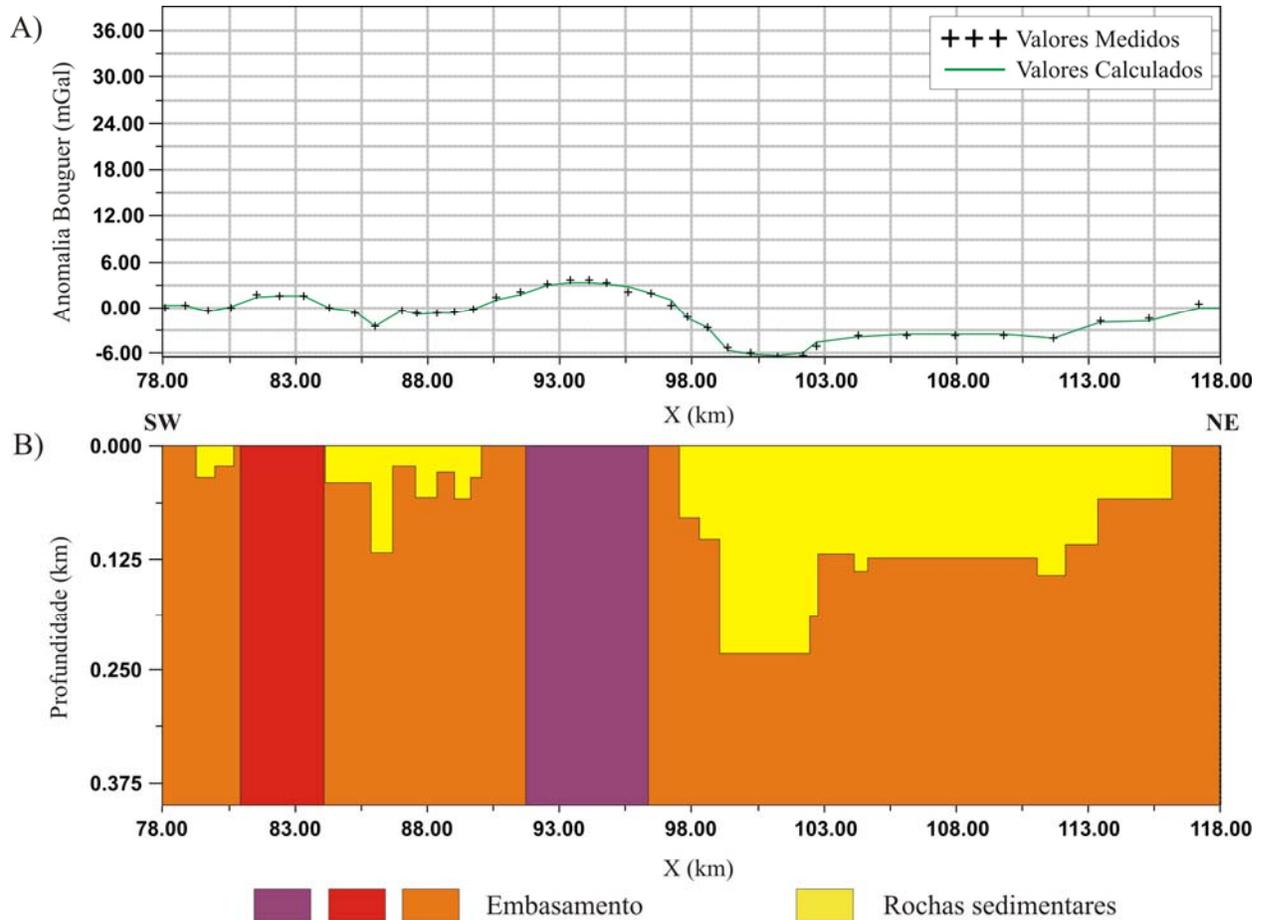


Figura 5.3 – (A) Perfil dos valores medidos e calculados da anomalia Bouguer. (B) Modelo interpretativo para a Crosta superior e rochas sedimentares. Em laranja, vermelho e roxo a crosta com densidade de 2.6 g/cm^3 , 2.62 g/cm^3 e 2.64 g/cm^3 respectivamente e em amarelo a cobertura sedimentar com densidade 1.9 g/cm^3 .

Na Figura 5.3-A estão representados os valores medidos (símbolo + em preto) e calculados (linha contínua em verde) para o modelo apresentado na Figura 5.3-B. A excelente correlação entre os valores medidos e calculados indica que o modelo na Figura 5.3-B é uma boa representação da subsuperfície.

O modelo sugere uma crosta superior heterogênea constituída de rochas com densidades 2.6 g/cm^3 (em laranja), 2.62 g/cm^3 (em vermelho) e 2.64 g/cm^3 (em roxo) que compõem o embasamento, e densidade 1.9 g/cm^3 (em amarelo) representando as rochas sedimentares.

Este modelo mostra contatos entre rochas de diferentes densidades no embasamento, corroborando com a teoria da geologia local. O modelo mostra, ainda, regiões com coberturas de rocha sedimentar, com espessuras variando de poucos metros até cerca de 250 metros. As variações abruptas nos contatos laterais entre as rochas do embasamento e os sedimentos sugerem a existência de falhas.

5.2 GPR

O levantamento com o GPR teve como objetivo principal localizar feições geológicas superficiais e tentar relaciona-las às grandes feições profundas. Durante o levantamento, foram realizados 11 perfis de GPR, cuja localização é mostrada na Figura 5.4

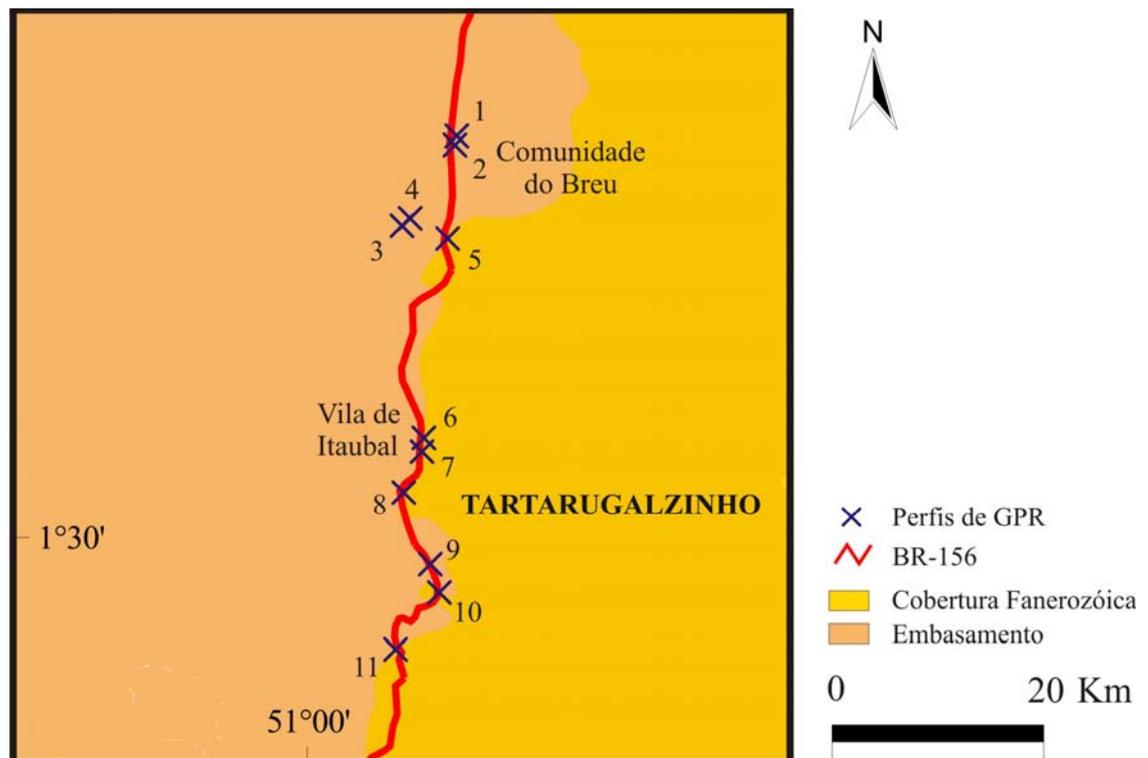


Figura 5.4 – Localização dos perfis de GPR.

Ao longo deste capítulo serão mostrados perfis que apresentam descontinuidades laterais nas interfaces de reflexão. Muitas dessas descontinuidades são caracterizadas pela passagem de zonas de atenuação para zonas em que o sinal apresenta grande amplitude. Nas zonas de atenuação não é possível distinguir nas imagens as interfaces de reflexão ou elas são pouco

visíveis. As zonas de grande amplitude caracterizam-se por uma coloração forte em tons vermelhos e azuis onde é possível observar-se com nitidez as interfaces de reflexão.

Uma outra característica que pode ser observada nas zonas de forte reflexão é a continuidade das interfaces que indica um meio acamado contínuo constituído por sedimentos ou rochas sedimentares. Por outro lado, quando essas interfaces não têm continuidade, apresentando um padrão aleatório, elas comumente se devem às rochas ígneas e/ou metamórficas que formam o embasamento.

Esses tipos de padrões observados nas imagens do GPR serão usados como parâmetro para definir os tipos litológicos na discussão dos perfis que será apresentada a seguir.

Os perfis 1 e 2 foram realizados na BR-156 a 40 km a norte de Tartarugalzinho, próximo à comunidade do Breu. A localização dos perfis é mostrada na Figura 5.5.

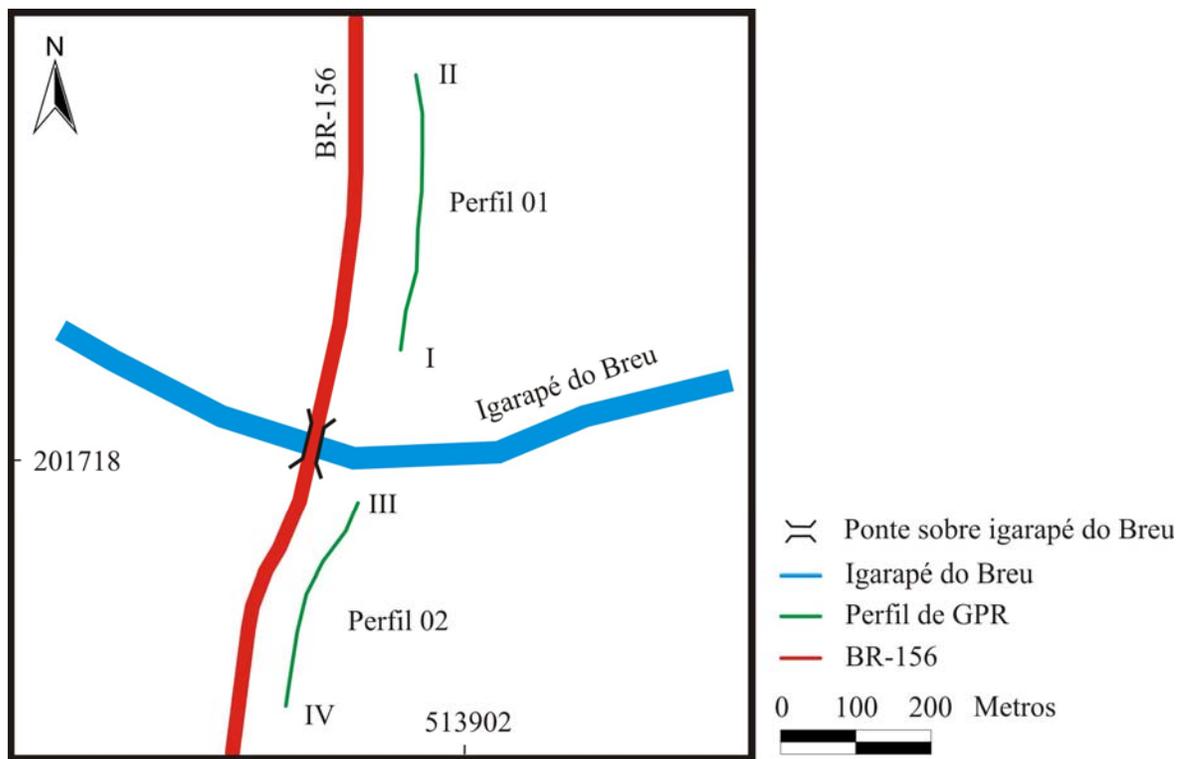


Figura 5.5 – Posicionamento em detalhe dos perfis 1 e 2 mostrados na Figura 5.4.

O perfil 1 foi executado com o início na posição I e fim na posição II (Figura 5.5), a norte da ponte que cruza o igarapé do Breu. Este perfil cobre uma extensão de 350 m (Figura 5.6).

No perfil da Figura 5.6 observam-se zonas com grande amplitude no sinal no início, na porção mediana e no seu final. Entre essas zonas ocorre forte atenuação no sinal.

A Figura 5.7 mostra um detalhe do perfil 1 entre as posições 0 m e 18 m. Nota-se, nesse detalhe, que no início do perfil entre as posições 0 e 2 m há uma região refletora contínua, que possivelmente está relacionada a uma feição acamada de sedimentos. Entre as posições 7 e 18 m, observa-se zona de grande amplitude do sinal (forte reflexão), que pode ser associada a rochas do embasamento preservadas ou pouco intemperizadas, uma vez que os refletores apresentam descontinuidades. A forte atenuação que ocorre nos flancos da zona, é provavelmente o resultado da ação do intemperismo sobre o embasamento. Outra possibilidade é ter havido um rebaixamento do embasamento (zona de forte reflexão) nas regiões de atenuação com subsequente preenchimento com rochas sedimentares.

Outro detalhe do perfil 1, cobrindo o intervalo 147 m – 183 m, é mostrado na Figura 5.8 (zona mediana de forte reflexão), onde é possível observar descontinuidades laterais nos registros, que podem ser devidas a falhas. A falta de continuidade lateral nos fortes refletores sugere a presença do embasamento. Duas feições destacam-se na Figura 5.8: a primeira entre as posições 152 m e 160 m, que mostra uma feição na forma de graben (mas pode ser apenas uma ondulação na superfície do embasamento); e, a segunda, na posição 166 m que sugere a existência de uma falha de cavalgamento.

Entre as posições 325 m e 347 m (Figura 5.9), é apresentado outro detalhe do perfil 1, onde aparece a zona de reflexão intensa que ocorre no final do perfil. A falta de continuidade nos refletores e o padrão aleatório das reflexões sugerem que a estrutura observada está atrelada ao embasamento. Algumas das descontinuidades observadas podem ser devidas a falhas ou fraturas.

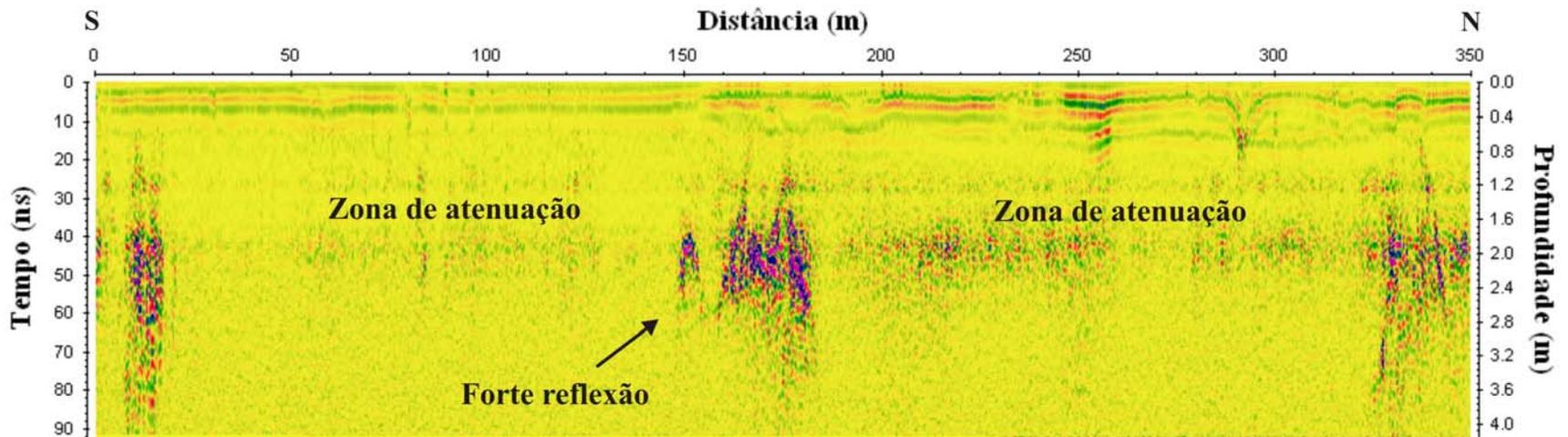


Figura 5.6 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 1 completo

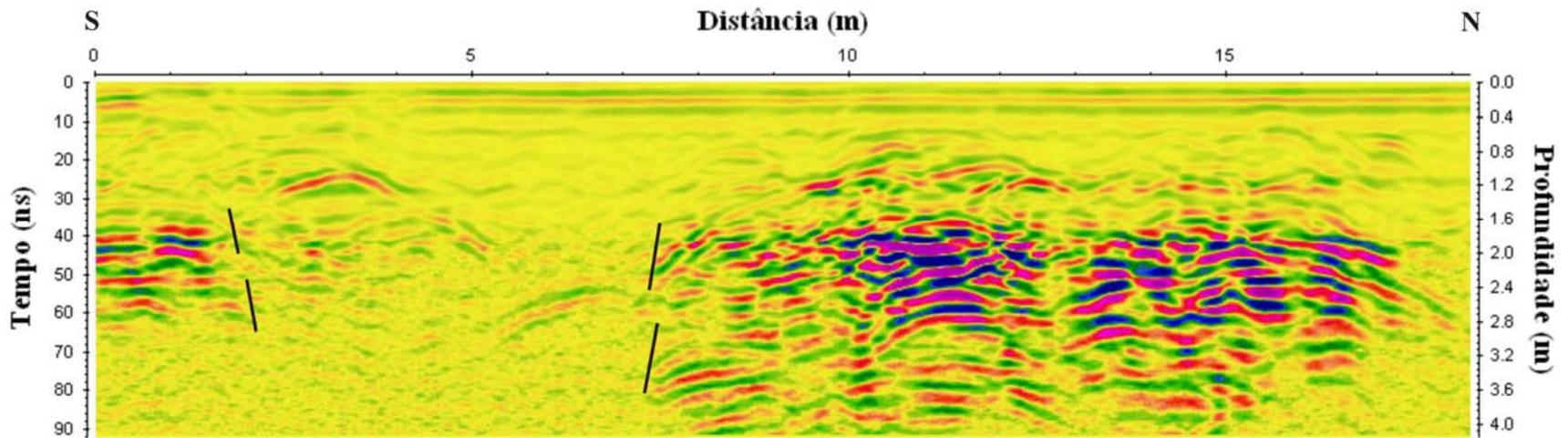


Figura 5.7 – Detalhe do perfil 1 de GPR mostrando o intervalo de 0 a 18 m.

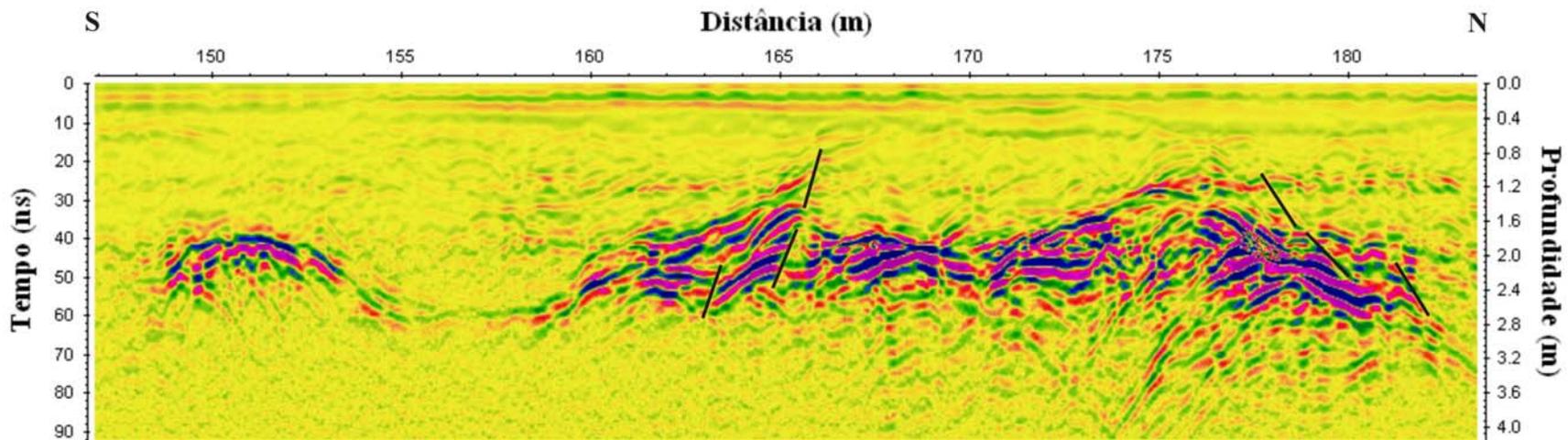


Figura 5.8 – Detalhe do perfil 1 de GPR mostrando o intervalo de 147 a 183 m.

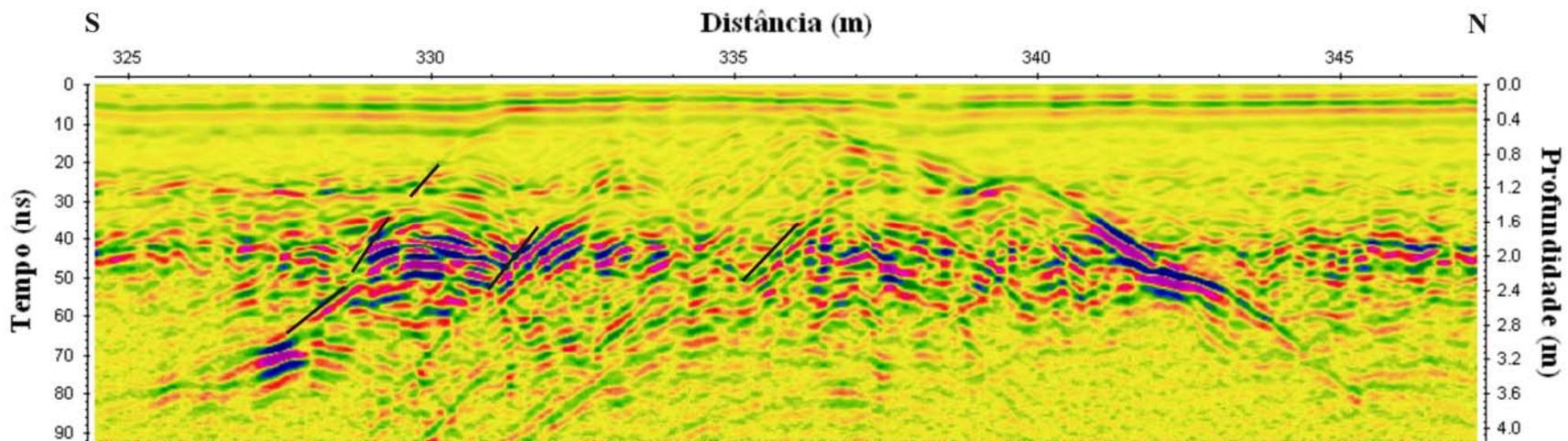


Figura 5.9 – Detalhe do perfil 1 de GPR mostrando o intervalo de 324 a 346 m.

O perfil 2 foi realizado da posição III a posição IV (Figura 5.5), a sul da ponte que cruza o igarapé do Breu. O perfil cobre uma extensão de 300 m conforme mostrado na Figura 5.10.

A 100 m do início do perfil, observam-se zonas de forte reflexão, que podem estar relacionadas ao embasamento. A partir da posição 100 m, o perfil registra uma zona atenuada, que pode estar relacionada à cobertura sedimentar.

A Figura 5.11 mostra detalhes dos primeiros 23 m do perfil 2, onde se pode observar a falta de continuidade lateral dos refletores e o padrão aleatório das reflexões, sugerindo a presença do embasamento. A zona de atenuação do sinal, localizada entre as posições 2 m e 12 m, indica maior incidência de intemperismo nesse local.

O detalhe do perfil 2 mostrado na Figura 5.12, evidencia entre as posições de 68 m e 110 m uma estrutura que se assemelha a um paleocanal.

Na Figura 5.13, o detalhe do perfil 2 mostra que entre as posições 130 m e 171 m, a 1 m de profundidade, ocorre outra estrutura semelhante a um canal. Ainda nessa figura, na posição 149 m nota-se uma feição característica de difração (hipérboles), que pode ter sido causada por uma tubulação metálica, por um cano de pvc ou de concreto contendo água, ou, ainda, por um rocha.

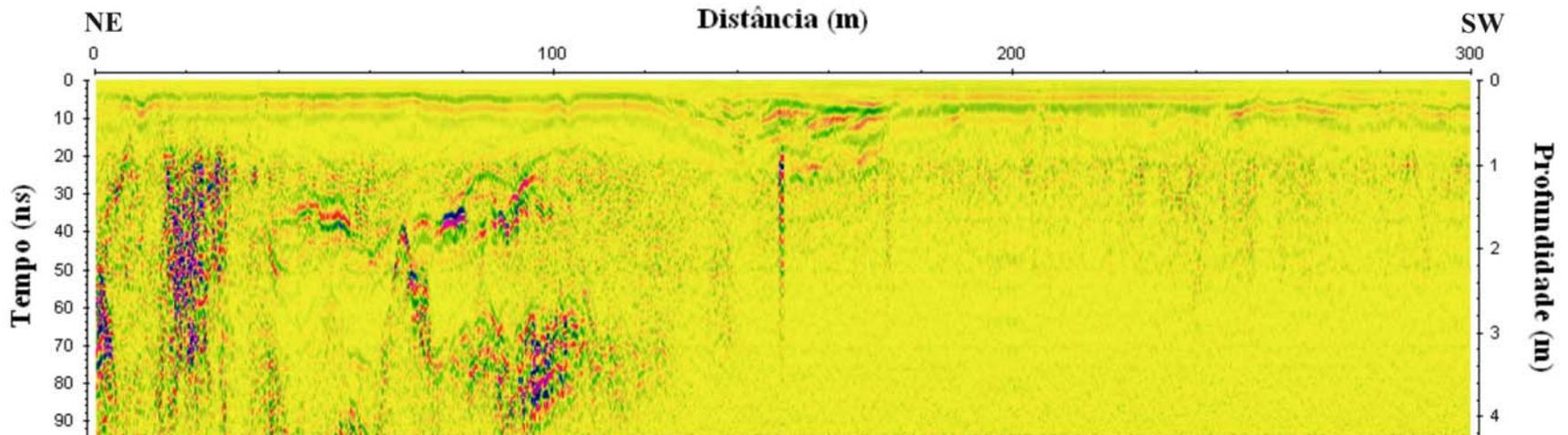


Figura 5.10 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 2 completo.

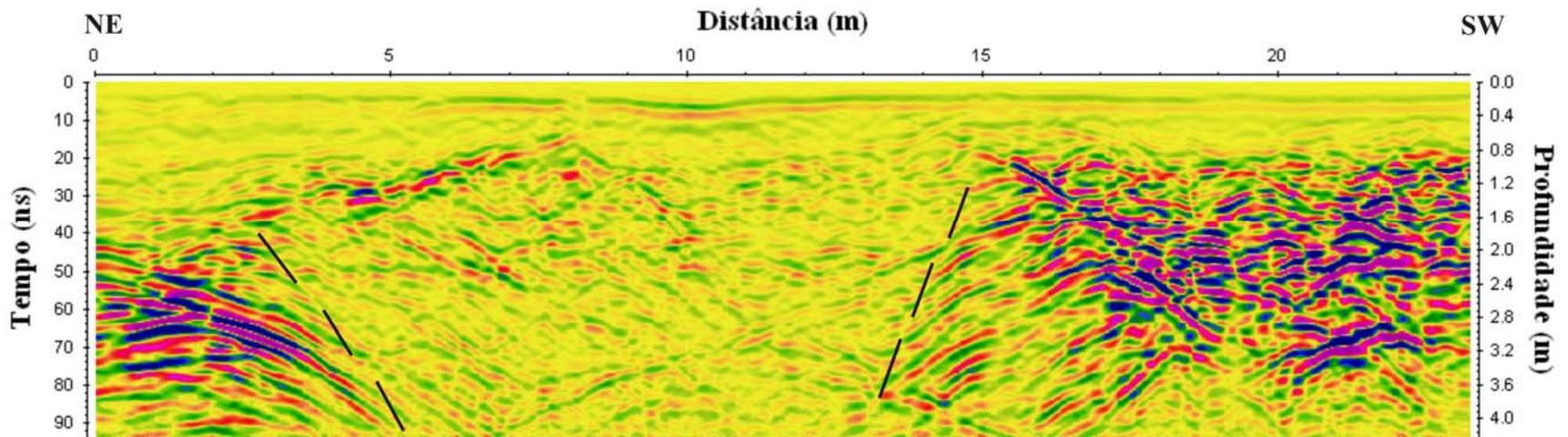


Figura 5.11 – Detalhe do perfil 2 de GPR mostrando o intervalo de 0 a 23 m.

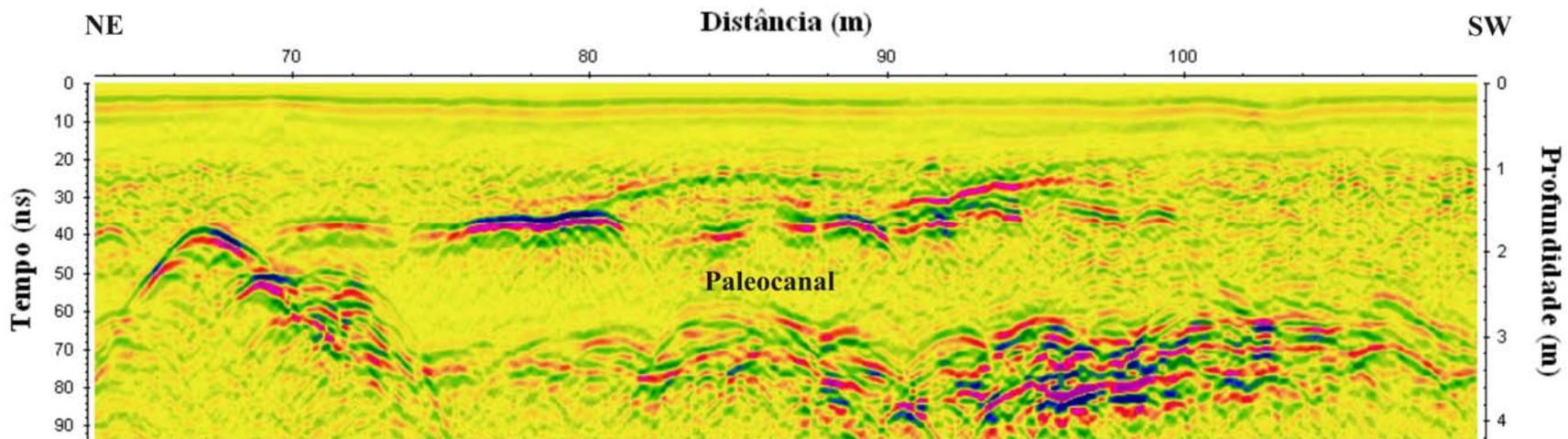


Figura 5.12 – Detalhe do perfil 2 de GPR mostrando o intervalo de 64 a 110 m.

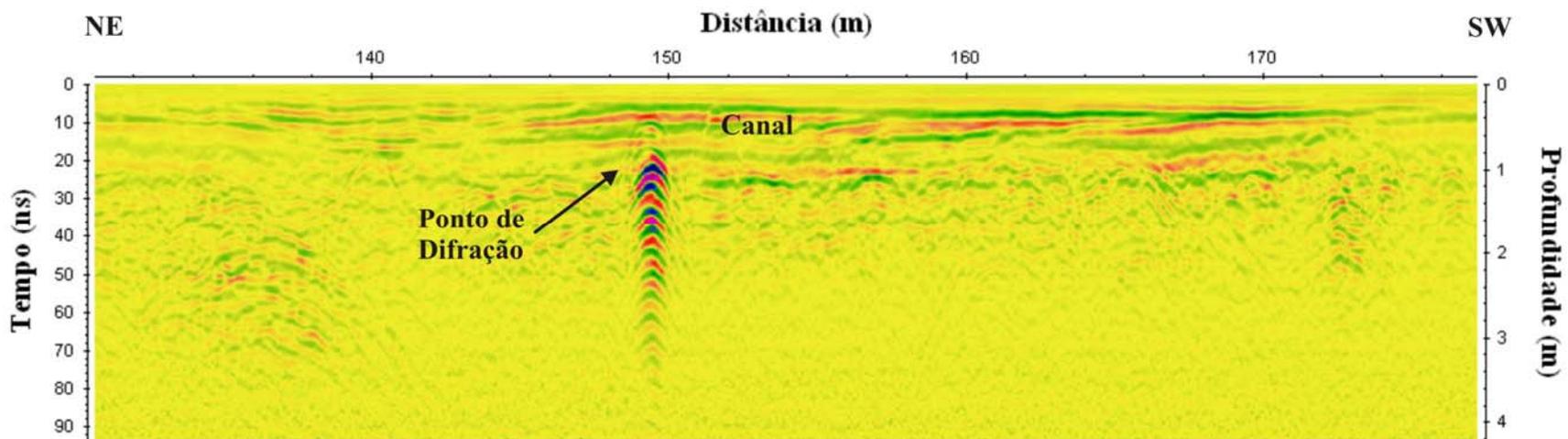


Figura 5.13 – Detalhe do perfil 2 de GPR mostrando o intervalo de 132 a 176 m.

Os perfis 3 e 4 foram realizados ao norte de Tartarugalzinho, em uma vicinal que se estende para oeste da BR-156 a 31 km de Tartarugalzinho. A localização dos perfis é mostrada na Figura 5.14.

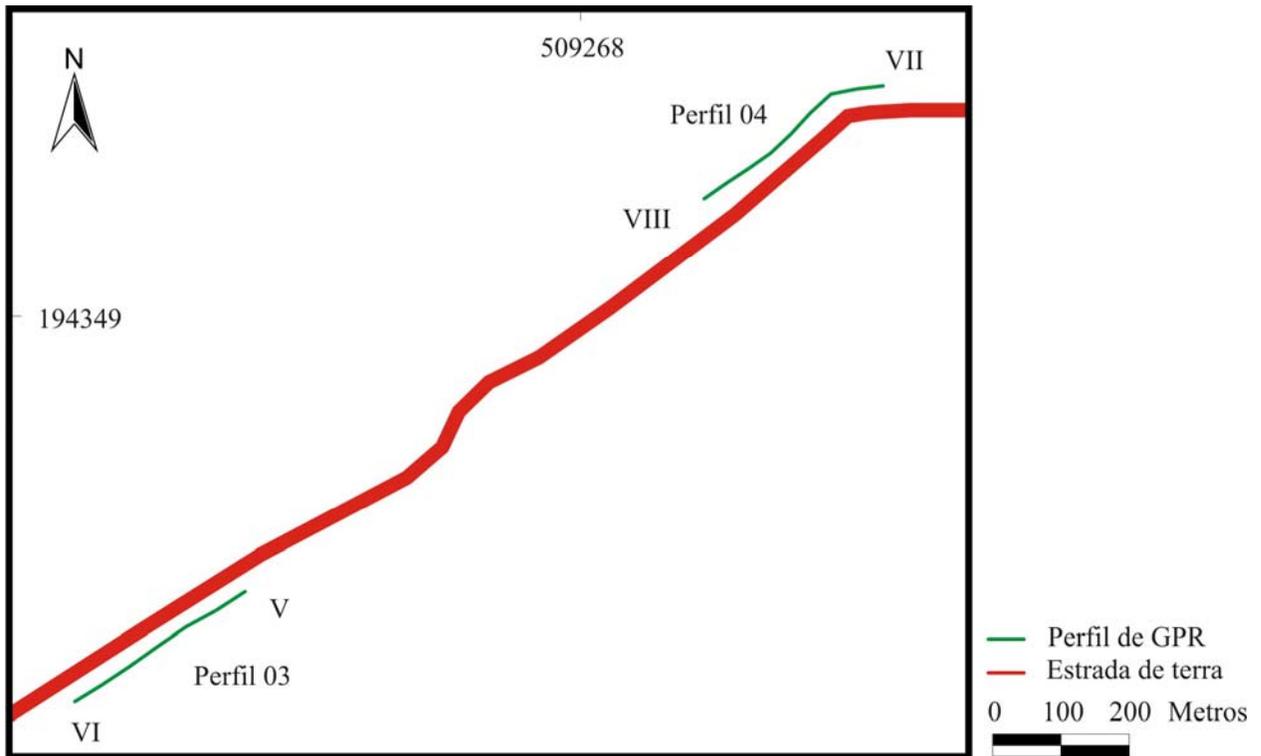


Figura 5.14 – Posicionamento em detalhe dos perfis 3 e 4 mostrados na Figura 5.4.

O perfil 3 com o seu início no ponto V e fim no ponto VI (Figura 5.14), está a 4,5 km da BR-156, cobrindo uma extensão de 300 m (Figura 5.15). Neste perfil, observa-se uma zona de forte reflexão encaixada em uma zona de atenuação. A zona de forte reflexão pode ser devida à presença de uma camada sedimentar, provavelmente de concreções ferruginosas (lateritas), pois o ambiente na região onde o perfil foi coletado favorece esse tipo de formação. A zona de atenuação foi provavelmente causada pela presença de material argiloso e/ou muito úmido.

Na Figura 5.16 é mostrado o intervalo 100 a 132 m do perfil 3 onde se pode observar a continuidade dos refletos, que confirma a idéia de uma camada sedimentar.

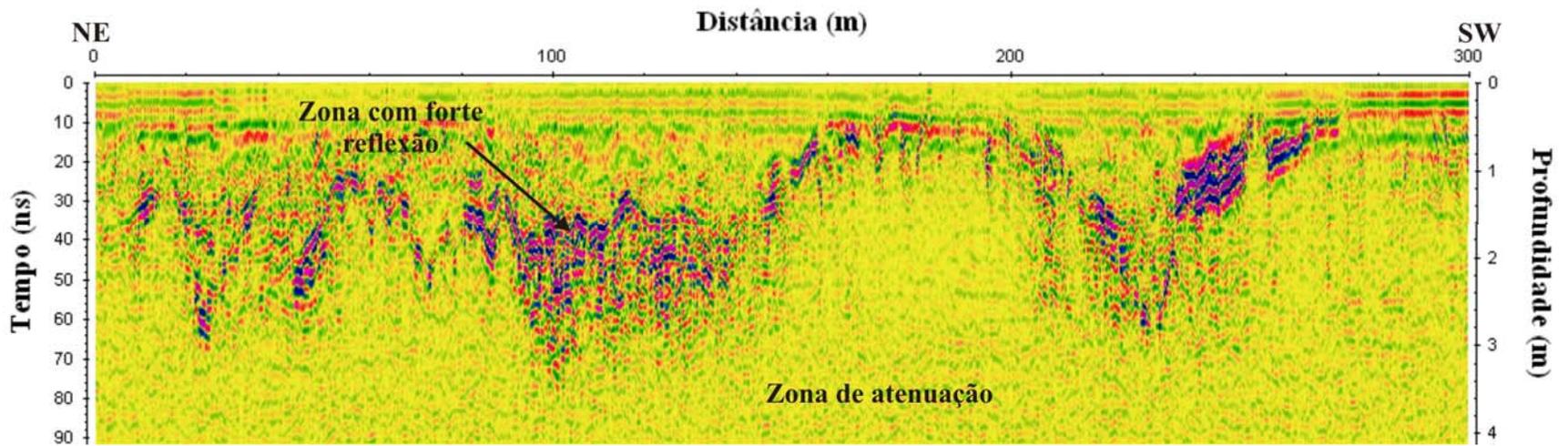


Figura 5.15 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 3 completo.

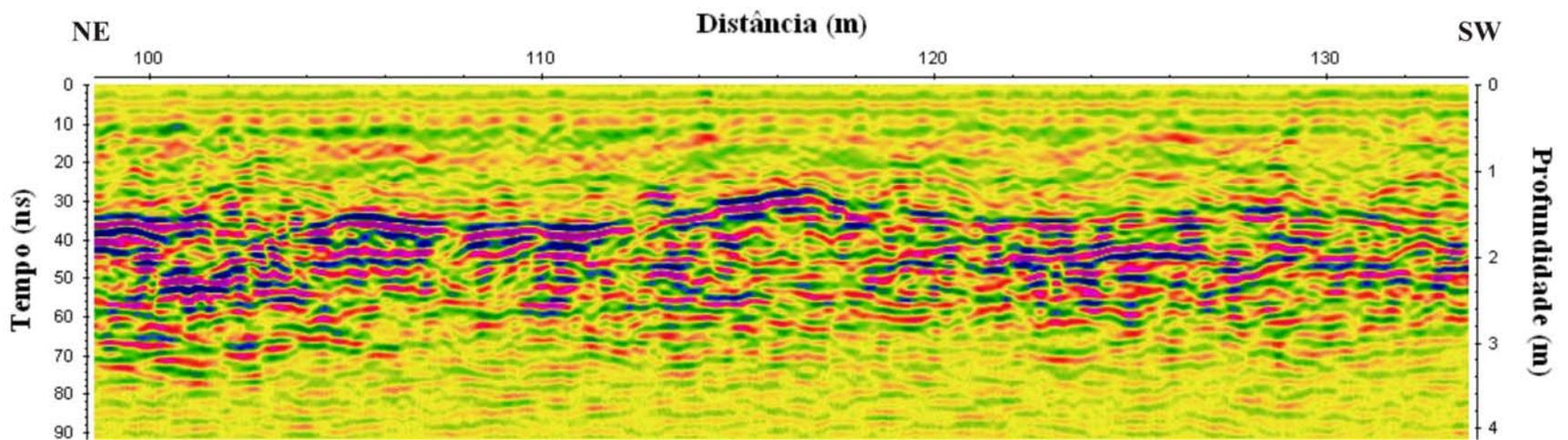


Figura 5.16 – Detalhe do perfil 3 de GPR mostrando o intervalo de 100 a 132 m.

O perfil 4 foi realizado a 3,5 km da entrada da BR-156 iniciando no ponto VII e finalizando no ponto VIII (Figura 5.14). O perfil cobre uma extensão de 320 metros conforme mostrado na Figura 5.17.

Entre o início do perfil 4 e a posição 150 m ocorre atenuação no registro que se estende desde o topo até a base. Isso foi provavelmente causado por uma predominância de material argiloso e/ou material muito úmido. A partir da posição 150 m é possível observar registros bem menos atenuados, sugerindo que houve uma mudança de material na subsuperfície a partir daquele ponto. Esta mudança está de acordo com a observação feita durante a execução do perfil de que na sua primeira metade o solo possuía uma coloração alaranjada, enquanto a sua outra metade possuía uma colocação branca.

Na Figura 5.18 é apresentado um detalhe do perfil 4 para o intervalo entre 139 m e 156 m. Observam-se na parte superficial (profundidade inferior a 0,80 m) refletores que se estendem por todo o intervalo, que sugerem a presença de rochas sedimentares. Abaixo desses refletores o padrão das reflexões deixa de ser contínuo, sugerindo a presença do embasamento, que deve estar intemperizado, pois o sinal aparece atenuado. Na imagem, é possível visualizar uma superfície ondulada de forte reflexão entre as profundidades de 2,4 e 4,0 m, que pode estar relacionada ao topo do embasamento não alterado. Uma descontinuidade que ocorre na posição 145 m, abaixo da profundidade 2,4 m, foi interpretada como uma possível falha. O forte refletor que aparece mergulhando para SW entre as posições 145 m e 157 m, a uma profundidade entre 2,4 m e 3,6 m, teve o seu mergulho exagerado na Figura 5.17 devido à escala de representação do perfil.

As Figuras 5.19 e 5.20 mostram detalhes do perfil 4 a partir do ponto 250 m. Nota-se na Figura 5.19, onde está representado o intervalo entre 250 e 267 m, os mesmos refletores superficiais contínuos, associados a rochas sedimentares, evidenciados na Figura 5.18. Logo abaixo desses refletores observa-se um forte refletor que pode ser o topo do embasamento não alterado. Na Figura 5.20, onde é mostrado o intervalo entre 280 e 297 m, observam-se feições similares às descritas na Figura 5.19, indicando uma continuidade para os refletores superficiais. Nesta figura, entretanto, o refletor associado ao embasamento inalterado encontra-se a maior profundidade e sotoposto por embasamento intemperizado.

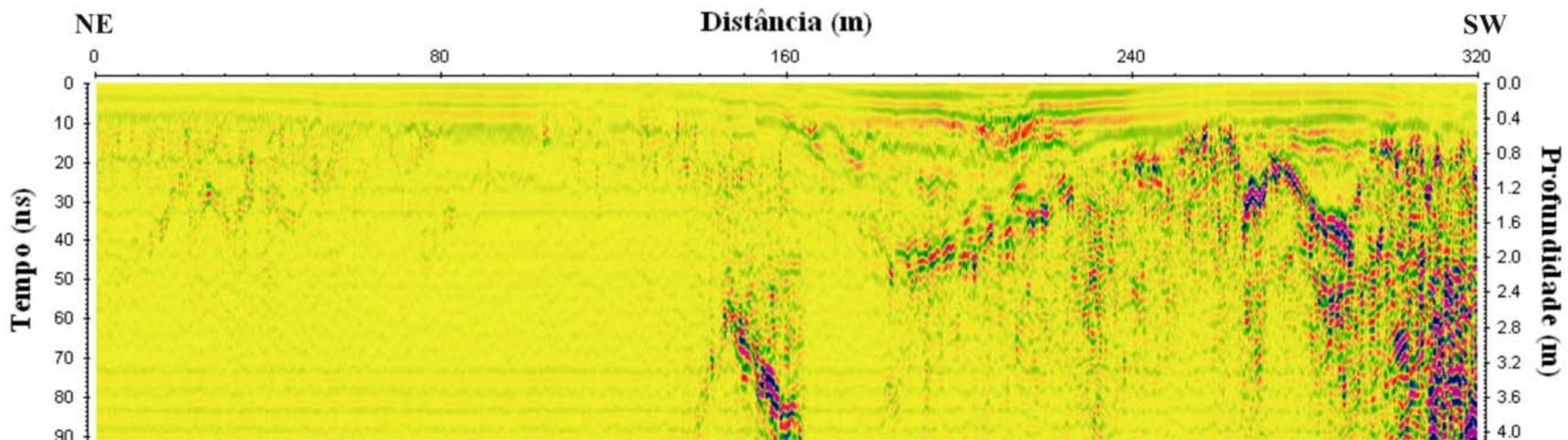


Figura 5.17 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 4 completo.

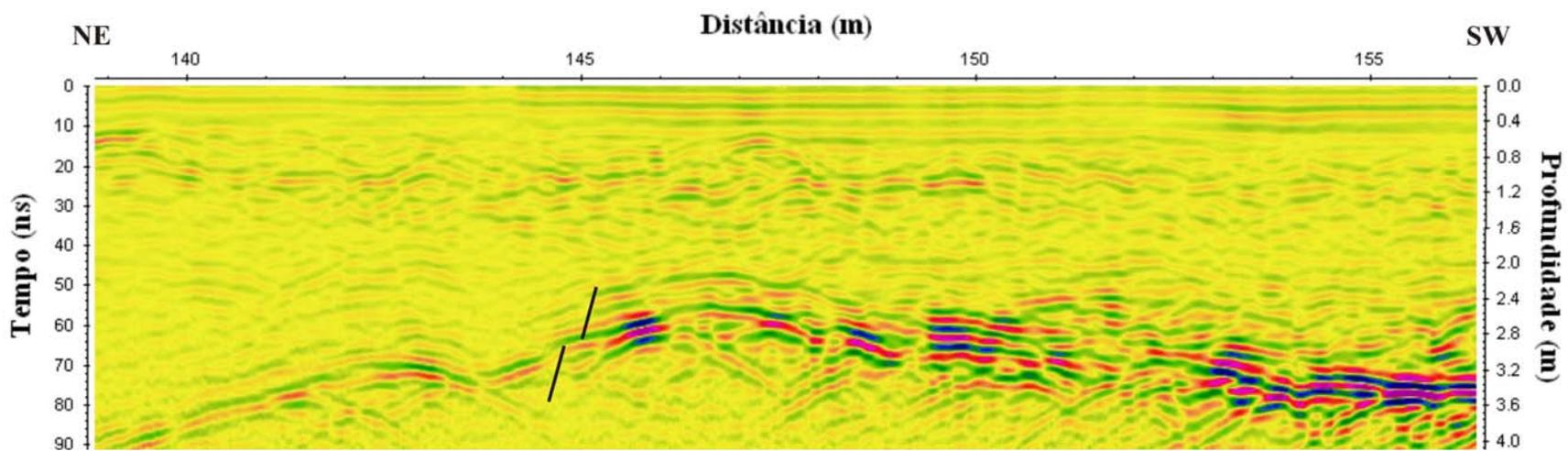


Figura 5.18 – Detalhe do perfil 4 de GPR mostrando o intervalo de 138 a 156 m.

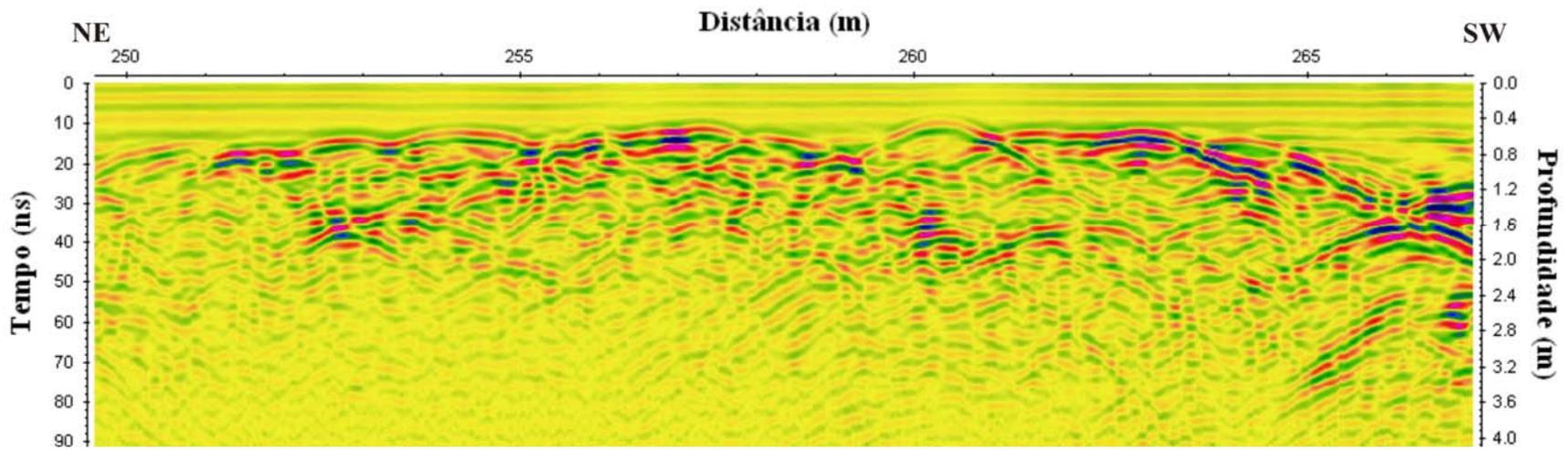


Figura 5.19 – Detalhe do perfil 4 de GPR mostrando o intervalo de 250 a 267 m.

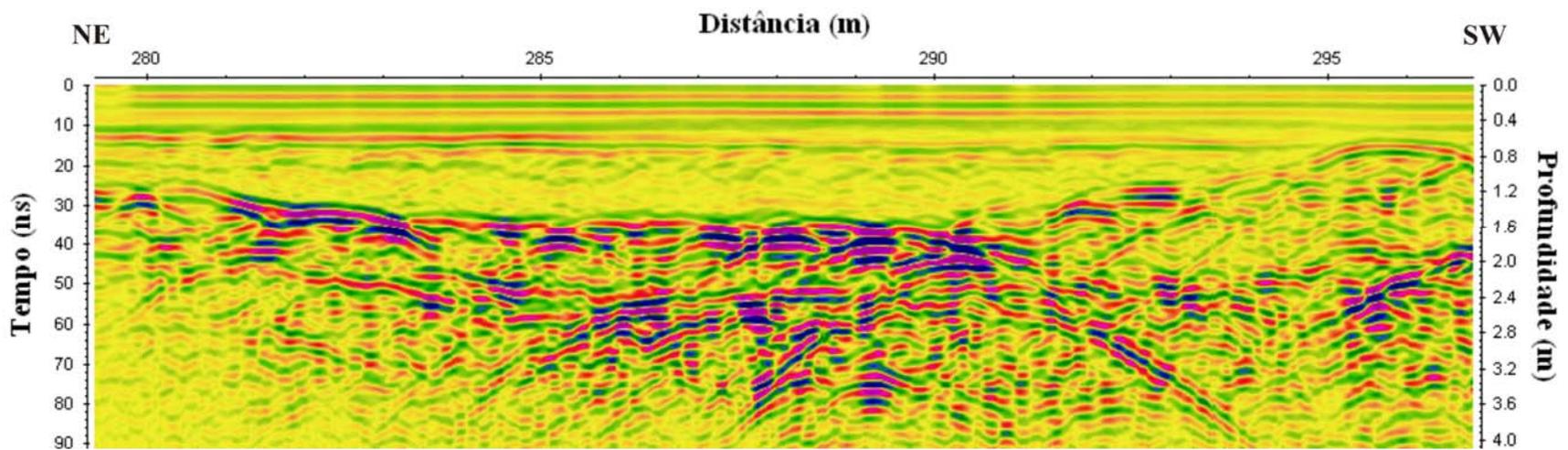


Figura 5.20 – Detalhe do perfil 4 de GPR mostrando o intervalo de 280 a 296 m.

O perfil 5 foi adquirido na BR-156 a 31 km a norte de Tartarugalzinho entre a posição IX e posição X (Figura 5.21). Este perfil possui extensão de 720 metros (Figura 5.23).

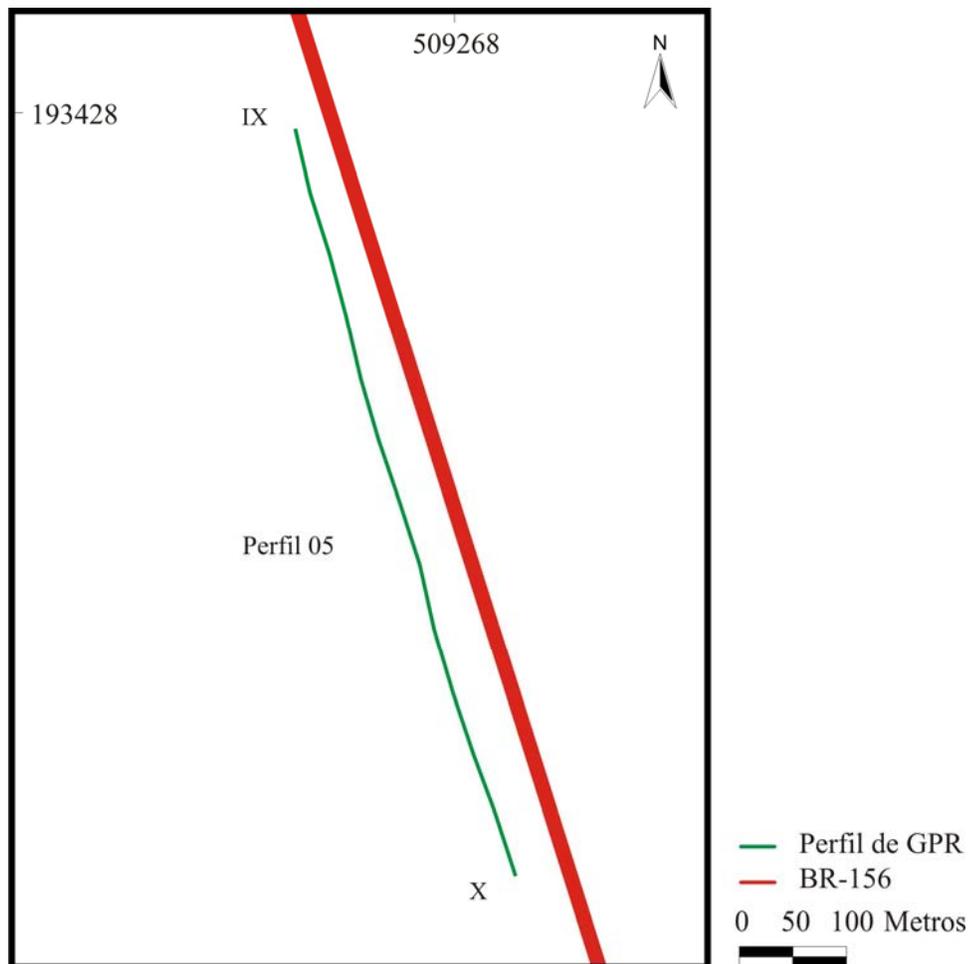


Figura 5.21 – Detalhe do posicionamento do perfil 5 mostrado na Figura 5.4.

No início do perfil, observa-se na imagem da Figura 5.23 uma feição de forte reflexão. Entre o início e o ponto 140 m, encontram-se feições horizontalizadas que podem indicar formações sedimentares. Do ponto 140 a 480 metros o registro continua com uma zona de forte reflexão, que pode estar relacionada ao embasamento, já que nessa região foram encontradas rochas graníticas próximas à superfície. A partir da posição 480 metros, o registro sofre forte atenuação que pode estar relacionada a uma zona rica em argila e/ou mais úmida. A região por onde o perfil passa é coberta por sedimentos recentes, observadas durante a aquisição do perfil.

Na Figura 5.24 observa-se um detalhe do perfil 5 entre os pontos 54 m e 116 m. Nota-se neste detalhe que há uma região de atenuação entre os pontos 78 m e 100 m. Esta atenuação pode estar relacionada a uma região rica em argila e/ou muito úmida, encaixada na formação sedimentar.

A Figura 5.25 mostra detalhes do perfil 5 entre as posições 227 m e 245 m. Observa-se que o registro possui reflexões sem continuidade lateral, com padrão aleatório, sugerindo que esta região seja o embasamento, fato comprovado por observações geológicas. Entre 460 m e 478 m (Figura 5.26) ocorre o mesmo padrão de reflexões observado na Figura 5.25, porém nessa figura aparecem atenuações no registro sugerindo variação litológica lateral.

O perfil 6, realizado do ponto XI ao ponto XII (Figura 5.22), cruza a vila de Itaupal, localizada a 9 km a norte de Tartarugalzinho na BR-156. Este perfil possui uma extensão de 660 m conforme mostra a Figura 5.27. Na figura, entre as posições 100 m e 220 m, a uma profundidade variando entre 0,4 m e 2,5 m, observa-se uma estrutura de forte reflexão, que se assemelha a um paleocanal. Uma outra estrutura semelhante, também pode ser observada a partir da posição 490 m até o fim do perfil. O perfil foi interrompido antes do final dessa estrutura.

O perfil 7 iniciado em XIII e finalizado em XIV (Figura 5.22), foi executado próximo à vila de Itaupal, 7,5 km a norte de Tartarugalzinho na BR-156. O perfil cobre uma extensão de 360 m (Figura 5.28). Observam-se no registro, zonas de alta atenuação intercaladas com zonas de forte reflexão. Essa modificação no registro pode estar atrelada às respostas do embasamento (forte reflexão) e dos sedimentos (atenuação).

O detalhe do perfil 7 representado na Figura 5.29 possibilita uma melhor visualização da feição de forte reflexão em forma de vale que se observa entre 27 m e 43 m na Figura 5.29. O forte refletor observado no detalhe deve representar a interface de separação entre o embasamento não alterado (na parte inferior) e o embasamento intemperizado. Na figura, também é possível observar descontinuidades laterais no forte refletor, que foram interpretadas como falhas.

Na Figura 5.30 está representado outro detalhe do perfil 7, cobrindo o intervalo 323 m a 339 m. Nela observa-se uma estrutura de forte reflexão que pode estar relacionada ao embasamento, já que as reflexões apresentam padrão aleatório. Essa estrutura cobre todo o intervalo do detalhe e ocorre a partir da profundidade aproximada de 1,5 m da superfície.

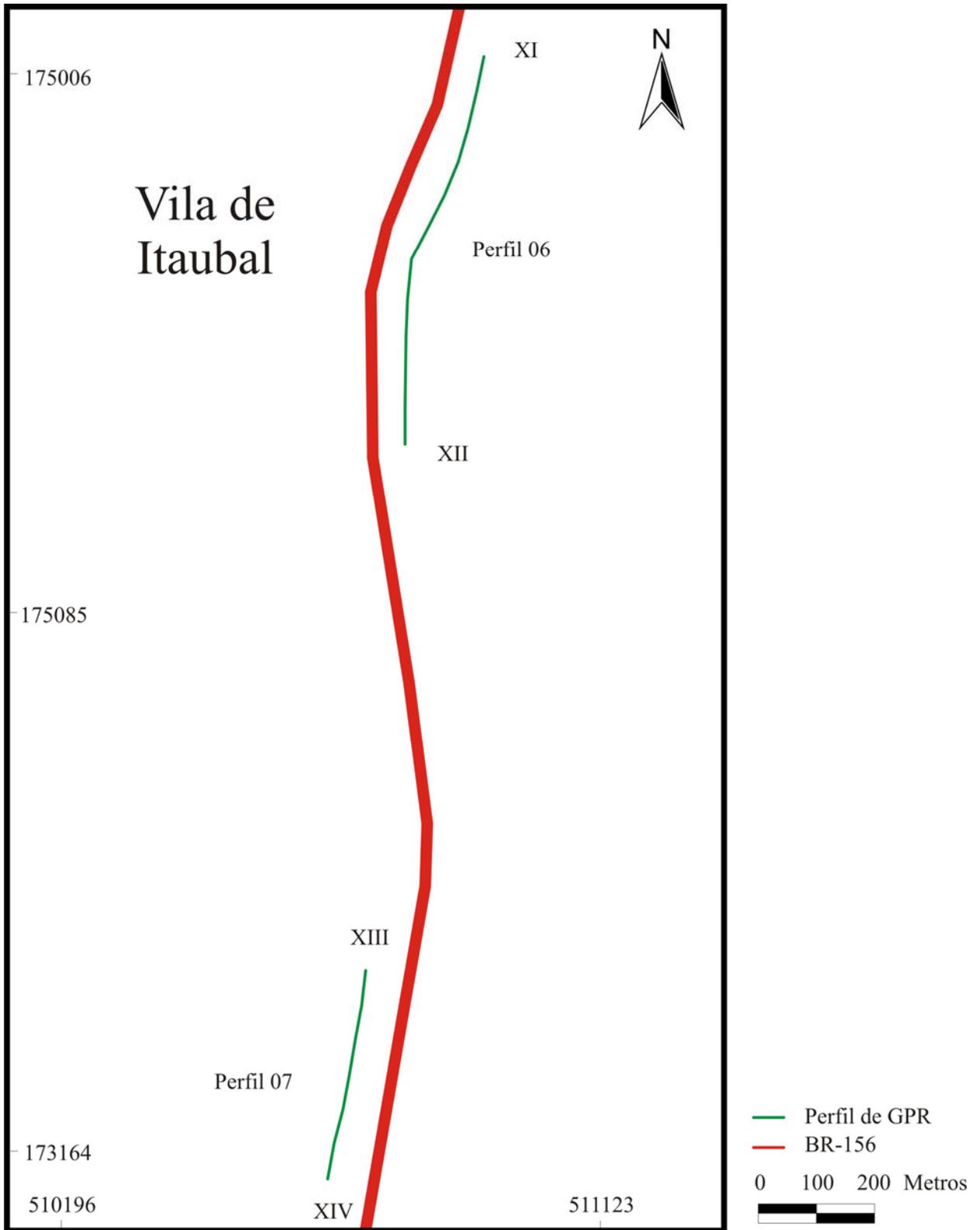


Figura 5.22 – Detalhe do posicionamento dos perfis 6 e 7 mostrados na Figura 5.4.

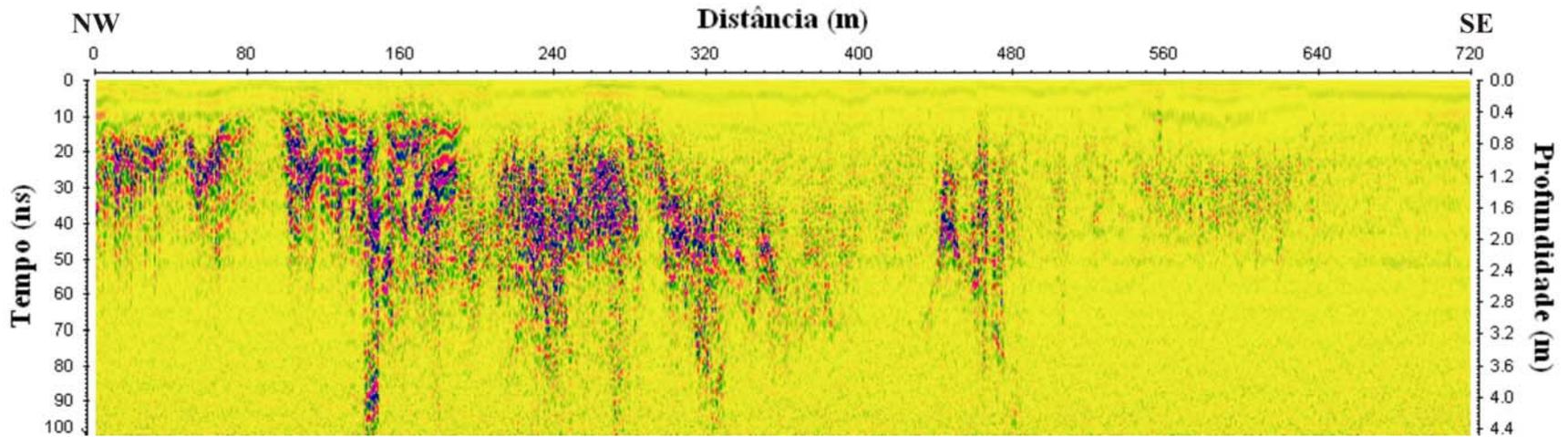


Figura 5.23 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 5 completo.

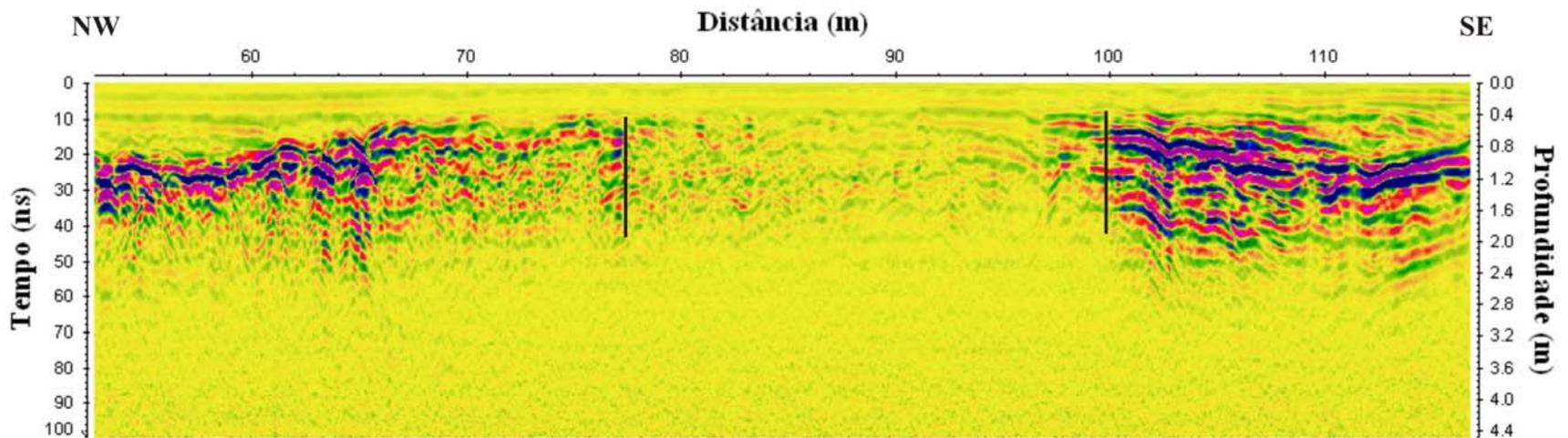


Figura 5.24 – Detalhe do perfil 5 de GPR mostrando o intervalo de 54 a 116 m.

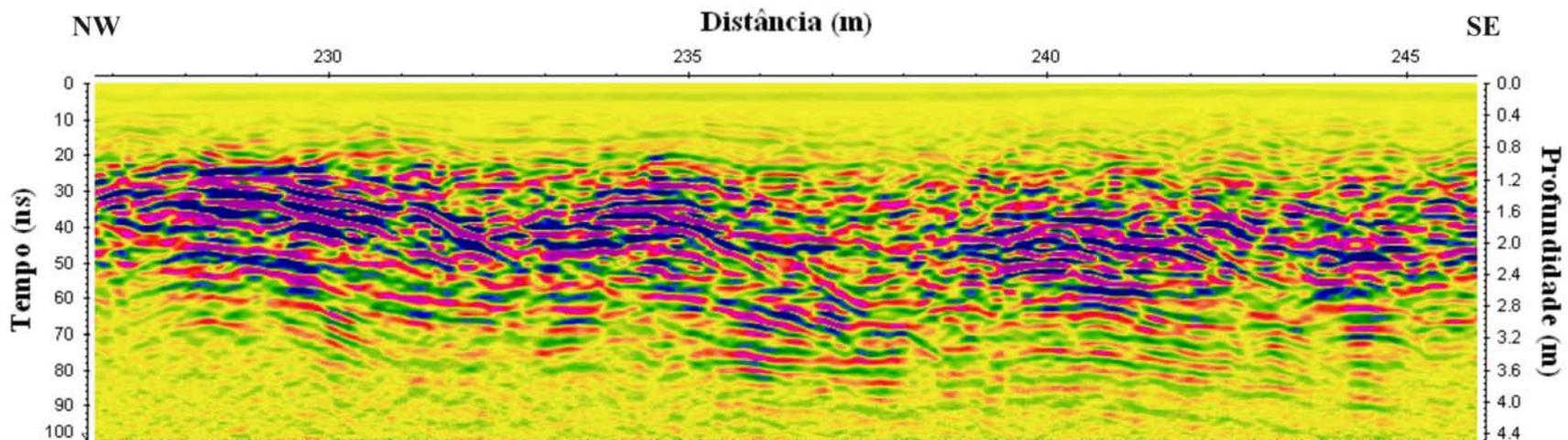


Figura 5.25 – Detalhe do perfil 5 de GPR mostrando o intervalo de 227 a 245 m.

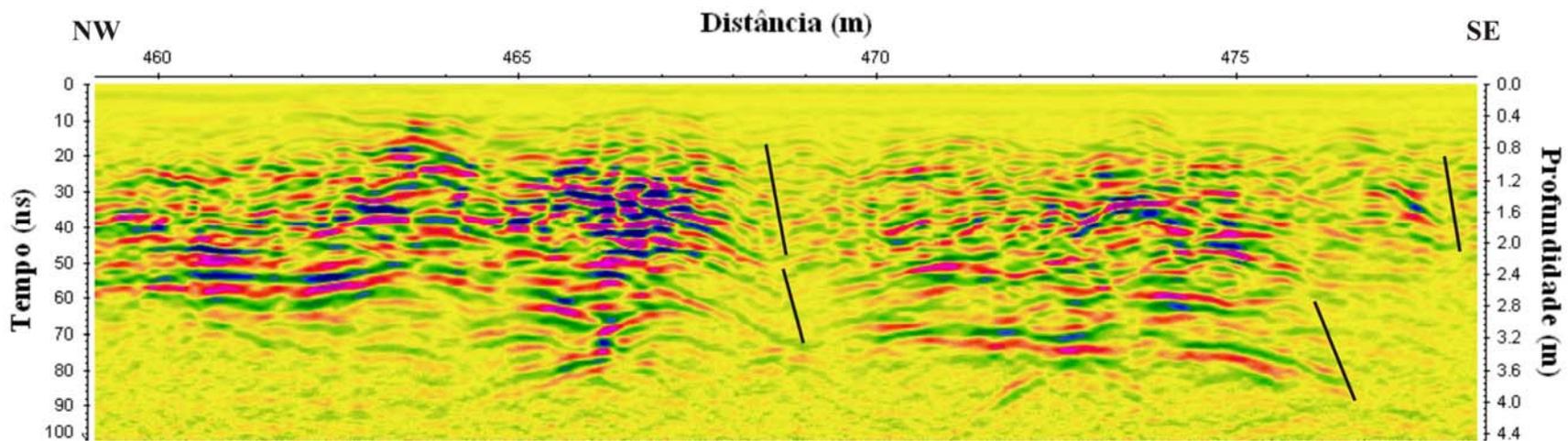


Figura 5.26 – Detalhe do perfil 5 de GPR mostrando o intervalo de 460 a 478 m.

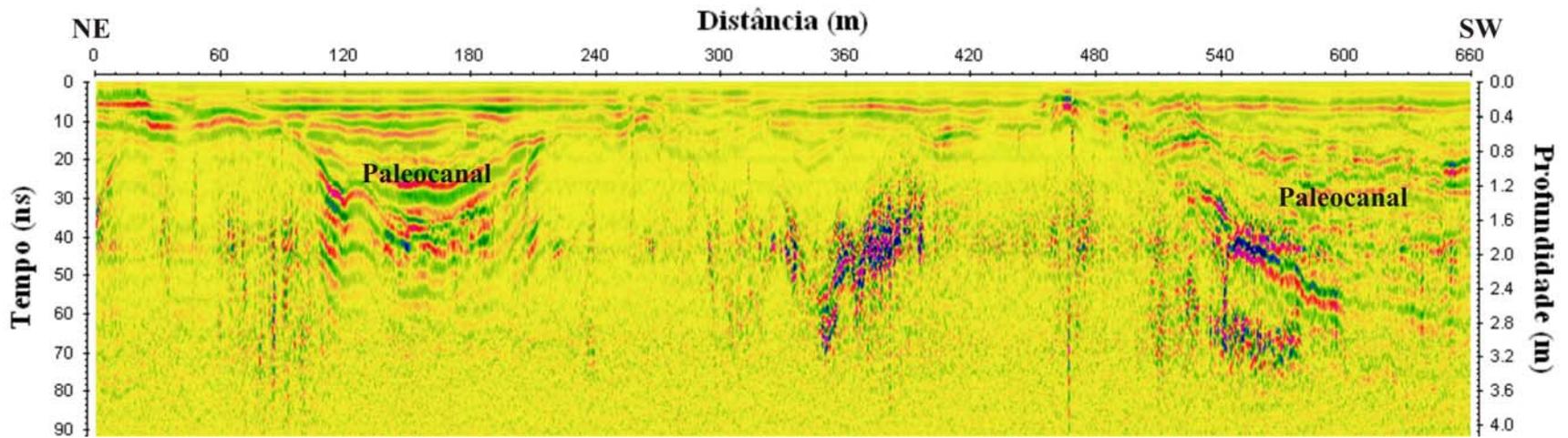


Figura 5.27 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 6 completo.

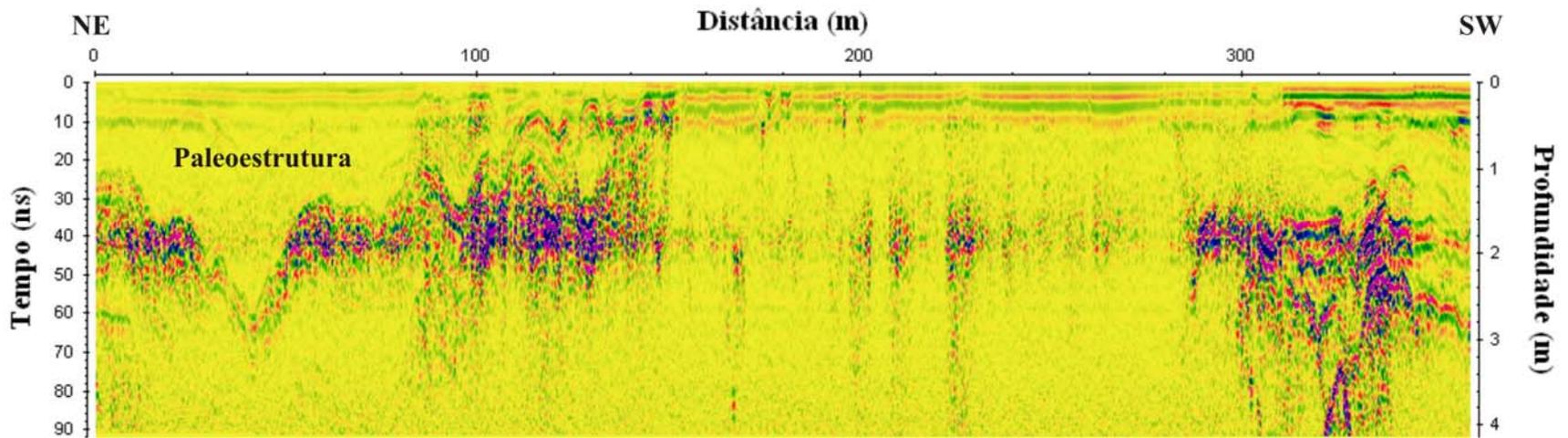


Figura 5.28 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 7 completo.

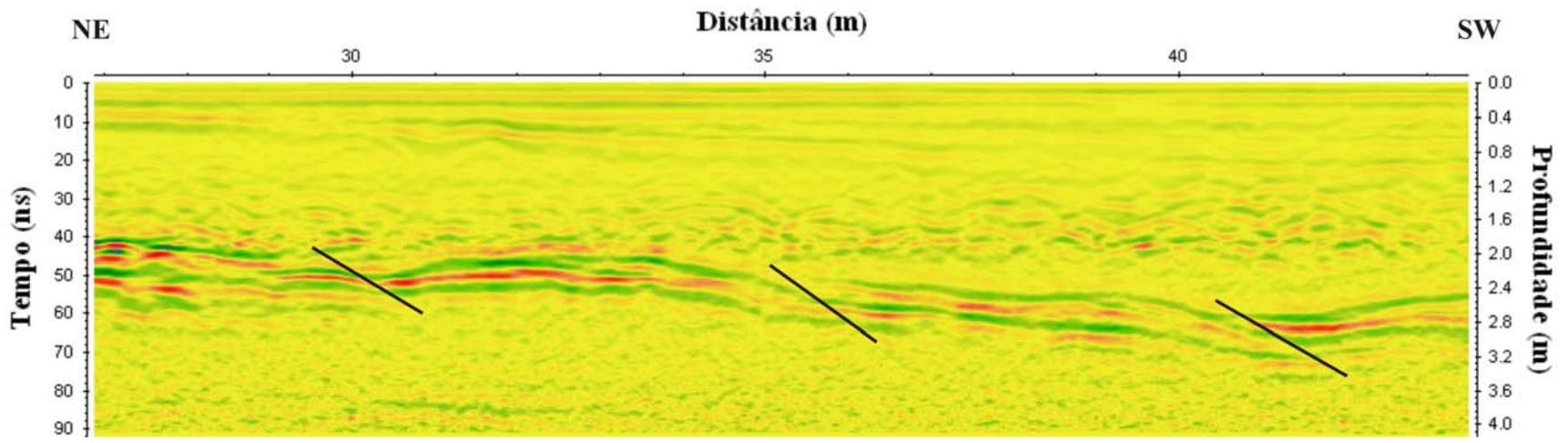


Figura 5.29 – Detalhe do perfil 7 de GPR mostrando o intervalo de 27 a 43 m.

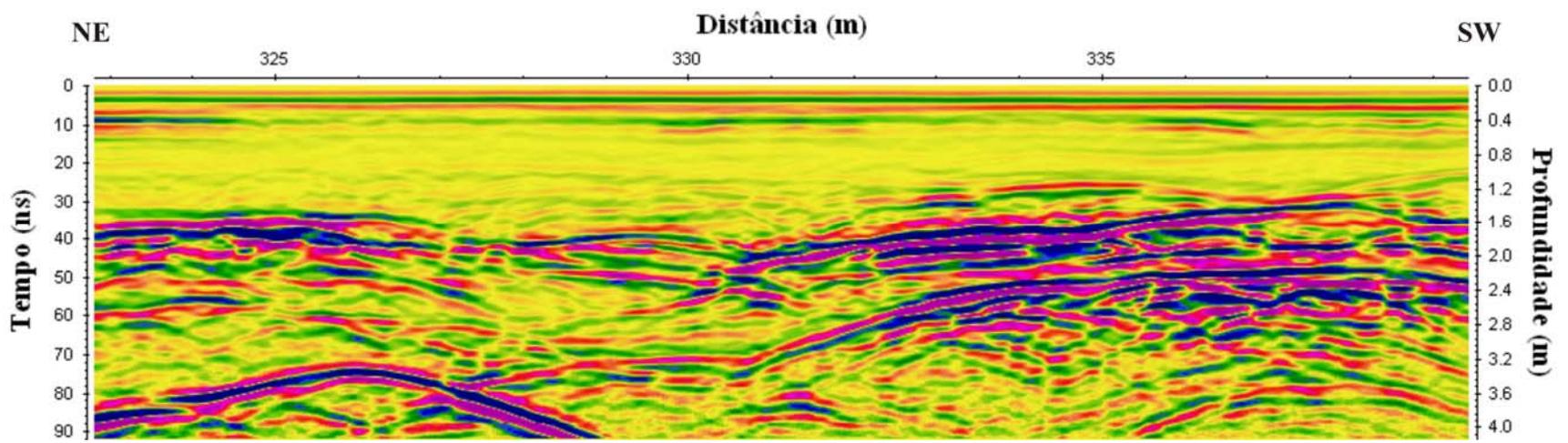


Figura 5.30 – Detalhe do perfil 7 de GPR mostrando o intervalo de 323 a 339 m.

O perfil 8 foi obtido entre as posições XV (início) e XVI (fim) mostradas na Figura 5.31. Ele está localizado 4 km a norte de Tartarugalzinho na BR-156. Este perfil possui a dimensão de 960 metros e foi dividido nas duas seções de tamanhos iguais representadas nas Figuras 5.32 e 5.33.

Na primeira seção do perfil (Figura 5.32), destaca-se uma feição entre as posições 40 m e 160 m, que pode estar associada a uma paleoestrutura observada durante o levantamento.

Na segunda seção (Figura 5.33), a forte zona de reflexão observada a uma profundidade que varia de aproximadamente 1,2 m a 2,8 m, pode estar relacionada ao embasamento não alterado. O detalhe da seção mostrado na Figura 5.34 sugere isso, uma vez que as fortes reflexões apresentam um padrão de refletores descontínuos e aleatórios. Observa-se ainda no detalhe (Figura 5.34), entre as posições 670 e 688 m, uma estrutura que se assemelha a um canal.

Ainda na segunda seção (Figura 5.33) observa-se, entre as posições 780 e 890 m, outra estrutura semelhante a um paleocanal. Evidências dessas estruturas foram observadas durante a aquisição dos dados em campo.

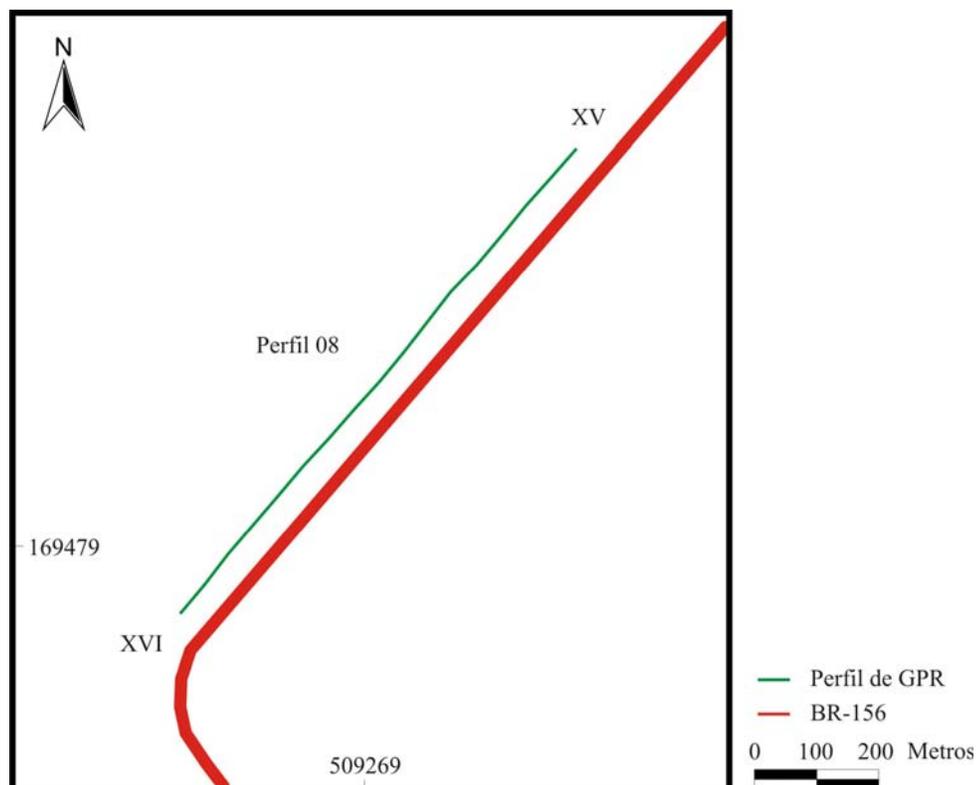


Figura 5.31 – Detalhe do posicionamento do perfil 8 mostrado na Figura 5.4.

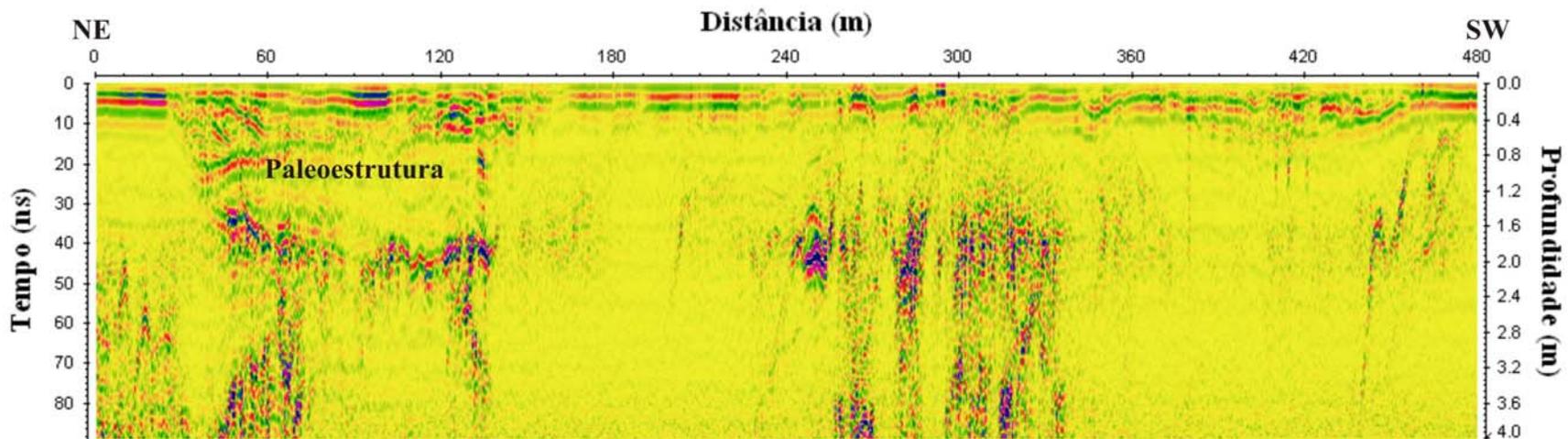


Figura 5.32 – Imagem de GPR mostrando a Seção 1 do perfil 8.

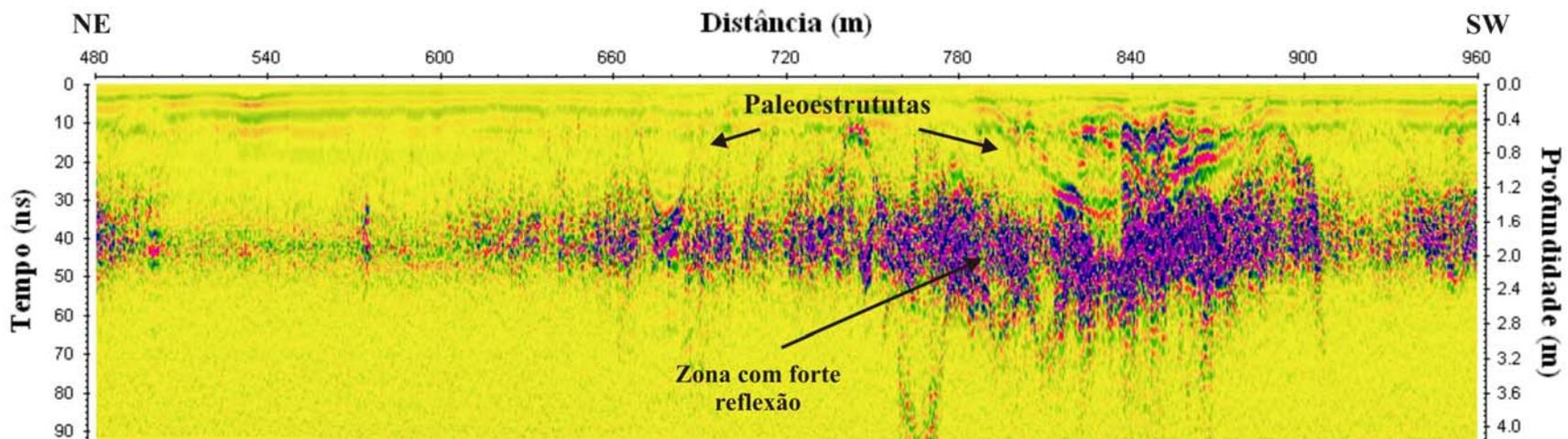


Figura 5.33 – Imagem de GPR mostrando a Seção 2 do perfil 8.

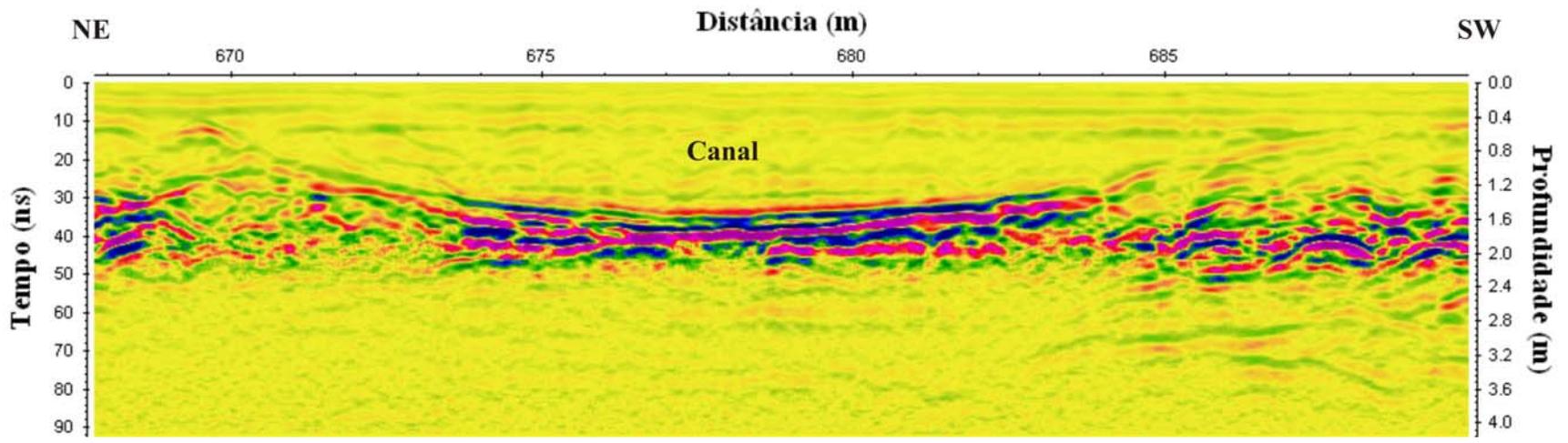


Figura 5.34 – Detalhe do perfil 8 de GPR mostrando o intervalo de 668 a 689 m.

O perfil 9 foi efetuado com o início na posição XVIII e fim na posição XVII (Figura 5.35), em um corte de estrada a 5 km a sul de Tartarugalzinho da BR-156. O perfil se estende por uma distância de 225 metros (Figura 5.36). Detalhes do perfil são apresentados nas Figuras 5.37 e 5.38.

Na Figura 5.37 nota-se que na região do perfil entre 93 m e 117 m ocorre uma feição rasa (profundidade entre 0,4 m e 1,0 m) que pode ser um canal sobreposto ao embasamento. Por outro lado, na Figura 5.38, que mostra o intervalo 120 m a 180 m, destacam-se feições de forte reflexão inclinadas com mergulho para NW. Essas feições podem estar associadas aos veios de quartzo encaixados em matriz de saprólito e rocha granítica observados em corte de estrada localizado próximo ao local do perfil.

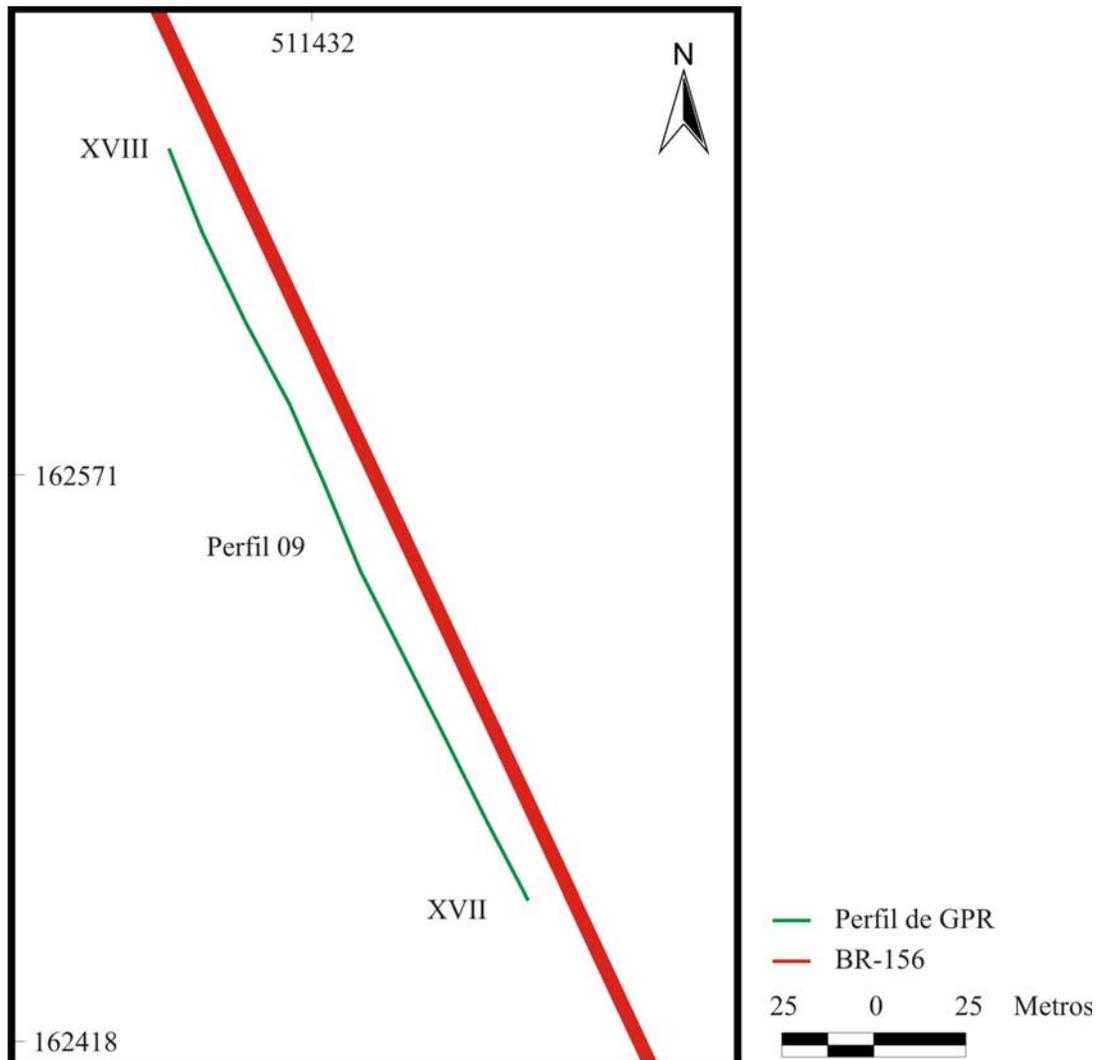


Figura 5.35 – Detalhe do posicionamento do perfil 9 mostrado na Figura 5.4.

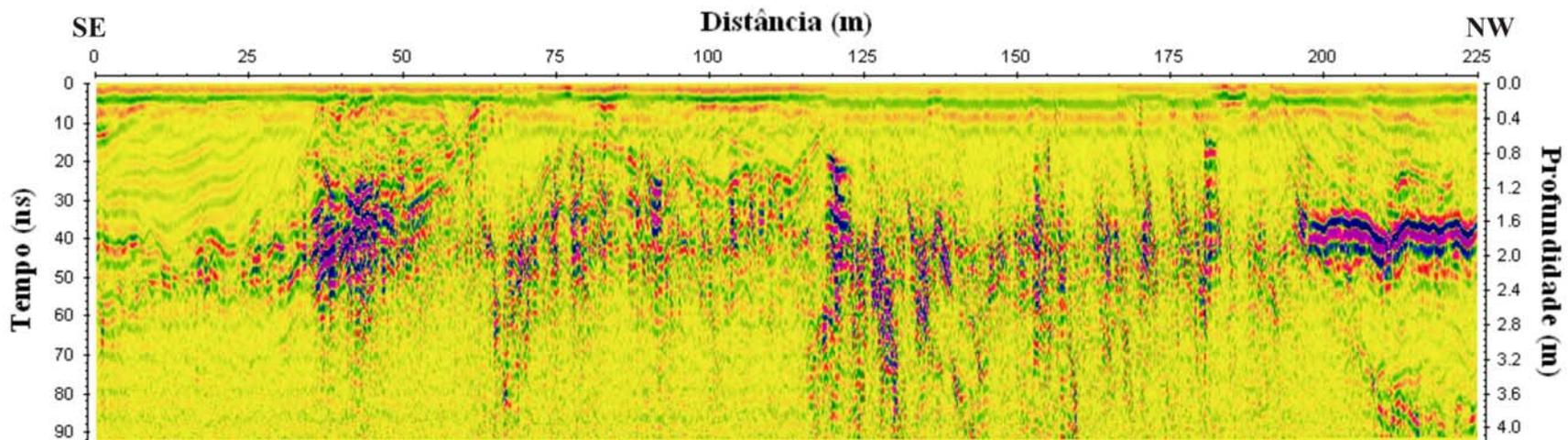


Figura 5.36 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 9 completo.

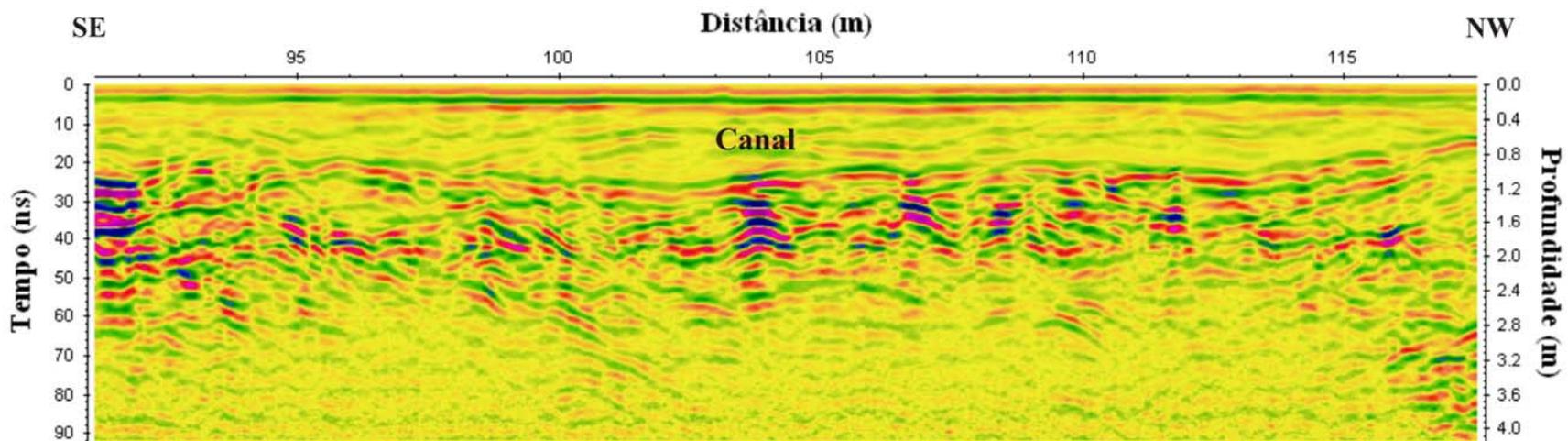


Figura 5.37 – Detalhe do perfil 9 sobre o intervalo 60 a 120 m.

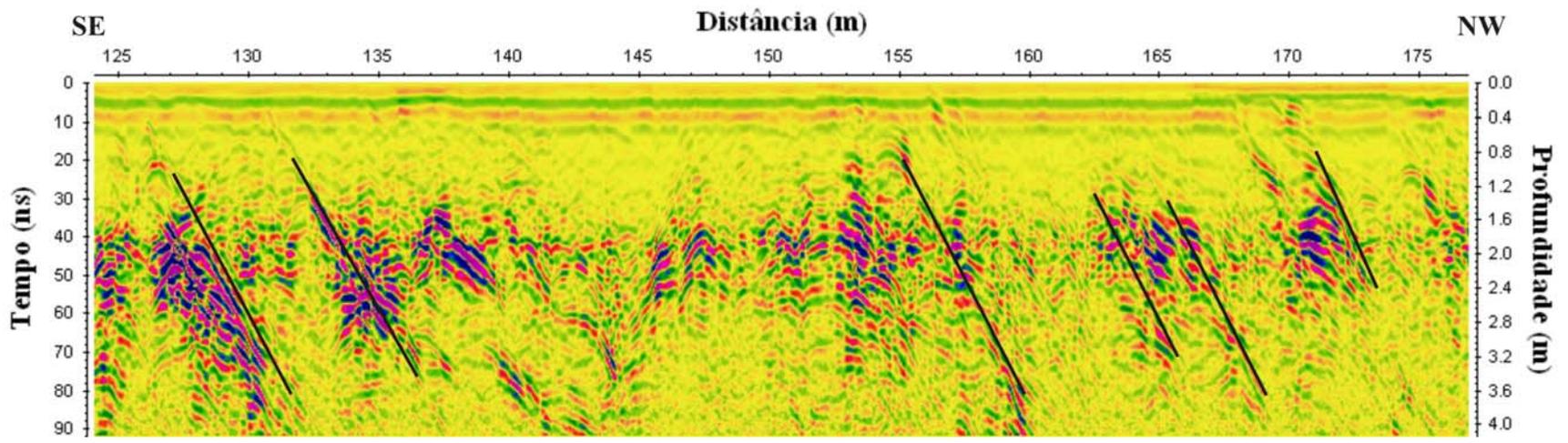


Figura 5.38 – Detalhe do perfil 9 cobrindo o intervalo de 120 a 180 m.

O perfil 10 foi adquirido na BR-156, a 8 km a sul de Tartarugalzinho entre o ponto XIX e o ponto XX (Figura 5.39). O perfil se estende por uma extensão de 500 metros (Figura 5.40).

Observa-se na imagem da Figura 5.40 que, entre o início do perfil até a posição 250 m, o registro sofre forte atenuação. Isso pode ser devido à ação de intemperismo, resultando em materiais mais argilosos. A partir da posição 250 m o registro mostra forte reflexão. Essa variação no registro provavelmente deve-se a mudança litológica de rochas sedimentares para rochas do embasamento.

A partir do ponto 300 m, no detalhe do perfil 10 mostrado na Figura 5.41, observam-se pequenas descontinuidades que separam a rocha sedimentar do embasamento. Também, entre os pontos 300 m e 360 m (Figura 5.41) e entre 460 m e 500 m (Figura 5.42), a uma profundidade de aproximadamente 2 metros, nota-se uma diferença no registro, que pode estar relacionada à variação litológica no próprio embasamento ou que essa região seja o embasamento inalterado.

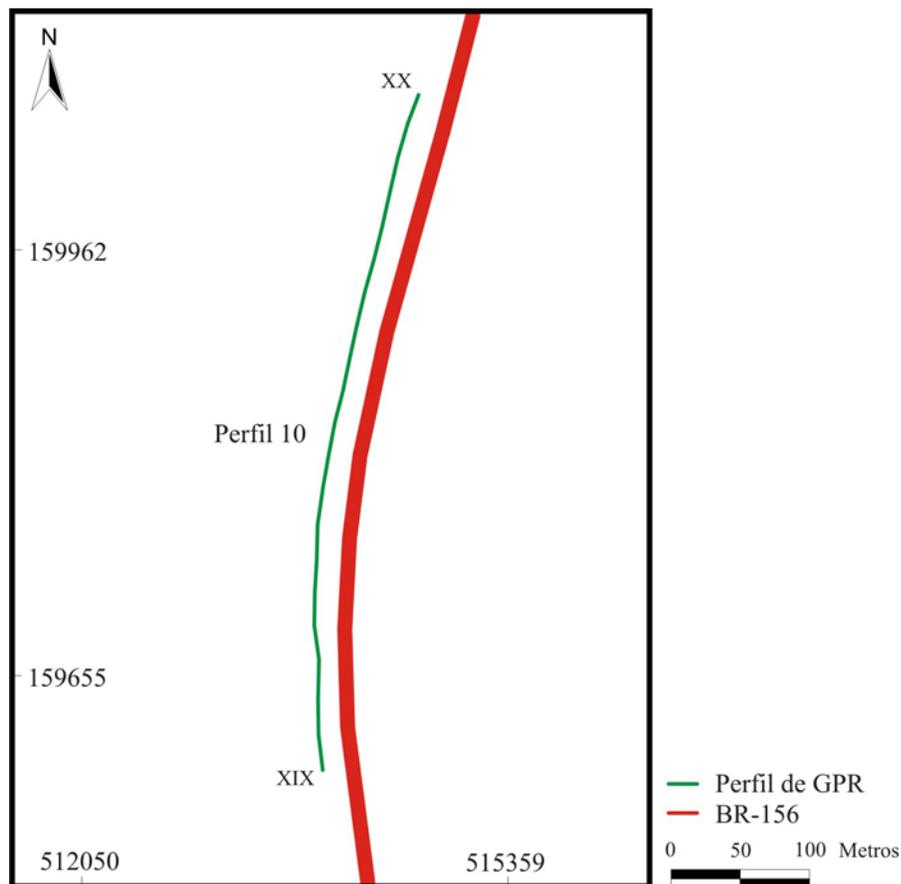


Figura 5.39 – Detalhe do posicionamento do perfil 10 mostrado na Figura 5.4.

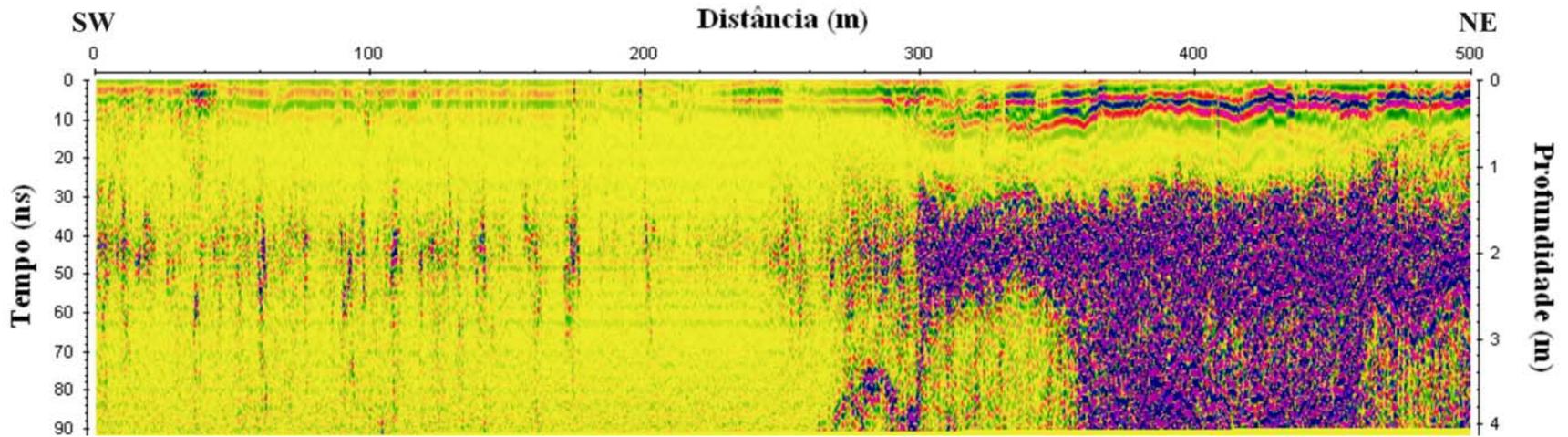


Figura 5.40 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 10 completo.

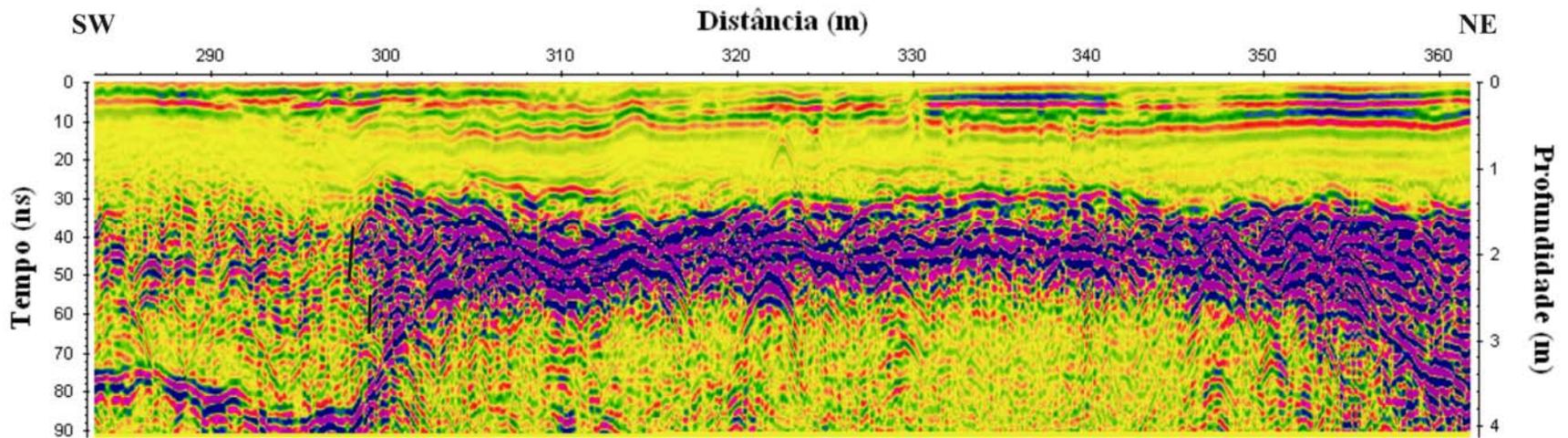


Figura 5.41 – Detalhe do perfil 10 cobrindo o intervalo de 284 a 360 m.

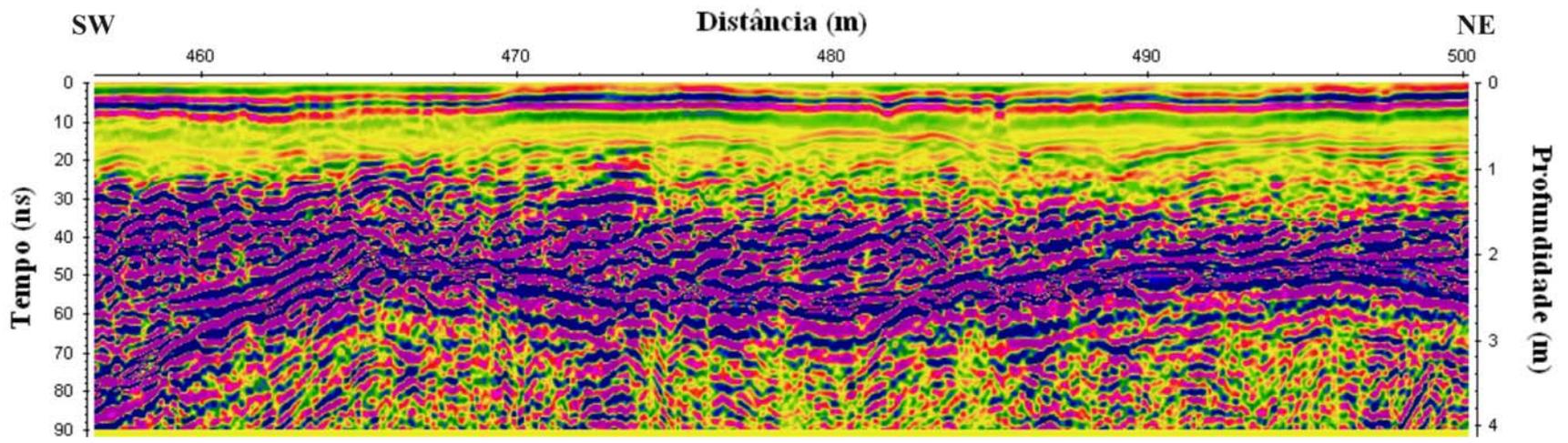


Figura 5.42 – Detalhe do perfil 10 cobrindo o intervalo de 458 a 500 m.

O perfil 11 foi executado na BR-156, próximo à ponte sobre o rio Tartarugal Grande, a 17 km a sul de Tartarugalzinho, entre o ponto XXI e o ponto XXII (Figura 5.43). Este perfil possui um comprimento de 275 metros conforme mostrado na Figura 5.44.

Ao longo de todo o perfil, observam-se refletores horizontais entre a superfície e a profundidade de 1,5 m. Como o perfil foi realizado muito próximo de um rio, essa estrutura horizontalizada pode ser devida à adição de aterro durante a construção da BR.

Abaixo da região aterrada, observa-se uma zona de forte reflexão entre as posições 0 e 75 m, que o padrão descontínuo e aleatório das reflexões sugere estar relacionada ao embasamento. Por outro lado entre os pontos 125 e 200 m (Figura 5.45), a forte zona refletora pode estar relacionada à interface de separação entre as rochas sedimentares e o embasamento. Ainda no perfil principal, entre os pontos 200 m e 275 m, nota-se uma estrutura que se assemelha a um paleoestrutura (Figura 5.46).

No detalhe do perfil 11, mostrado na Figura 5.47, destaca-se, na posição 200 m, a feição que sugere uma falha de cavalgamento.

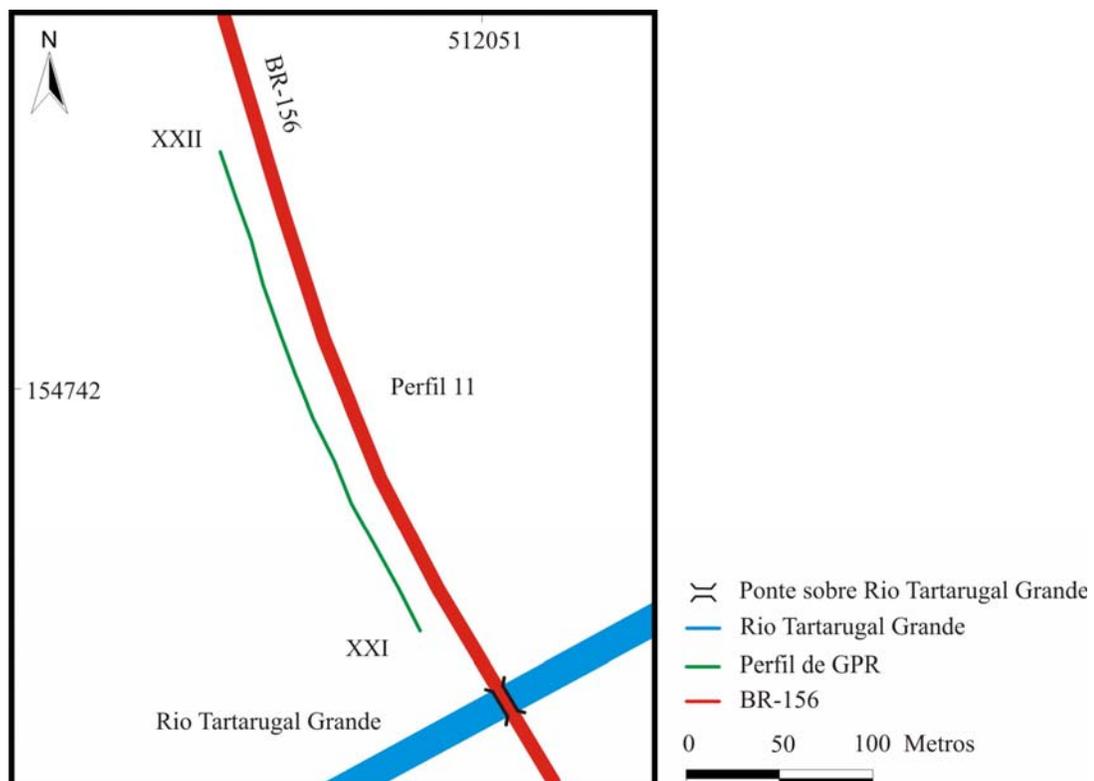


Figura 5.43 – Detalhe do posicionamento do perfil 11 mostrado na Figura 5.4.

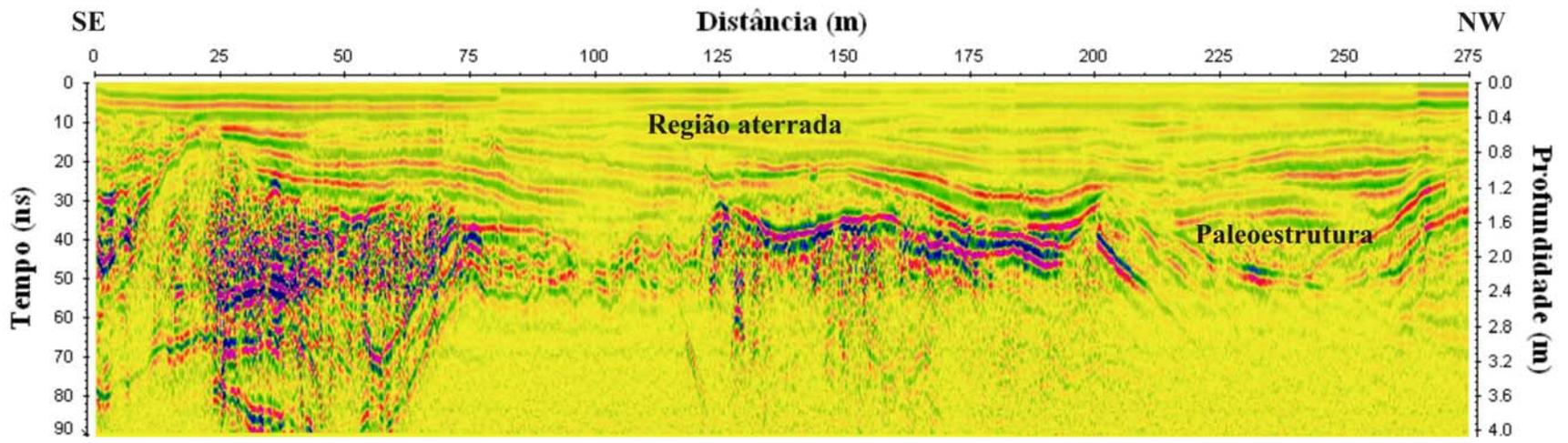


Figura 5.44 – Imagem de GPR mostrando o Perfil 11 completo.

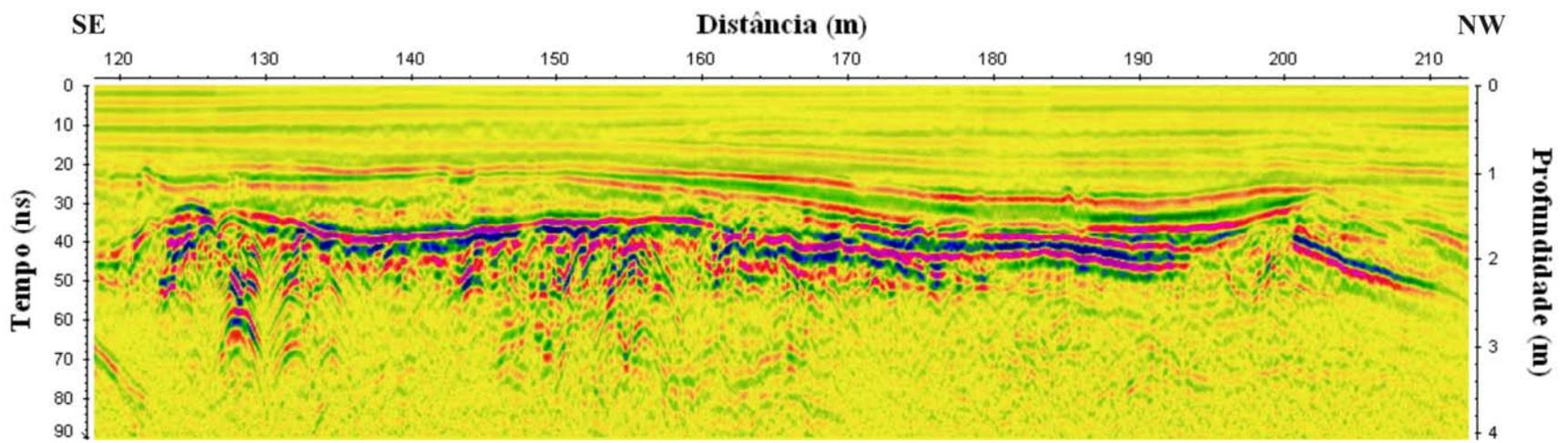


Figura 5.45 – Detalhe do perfil 11 sobre o intervalo de 120 a 212 m.

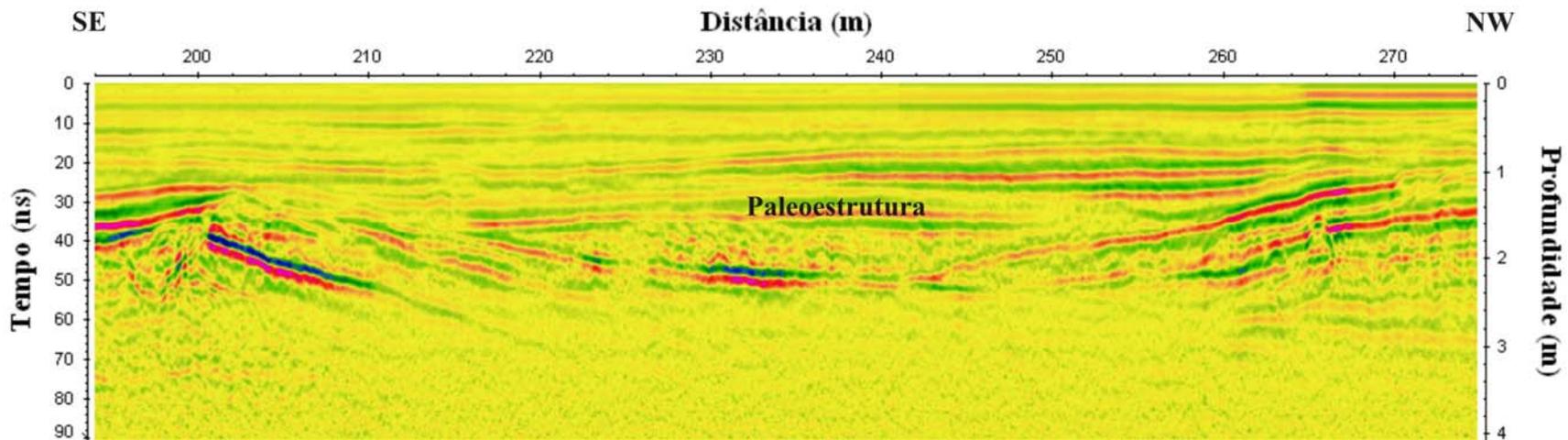


Figura 5.46 – Detalhe do perfil 11 sobre o intervalo de 194 a 275 m.

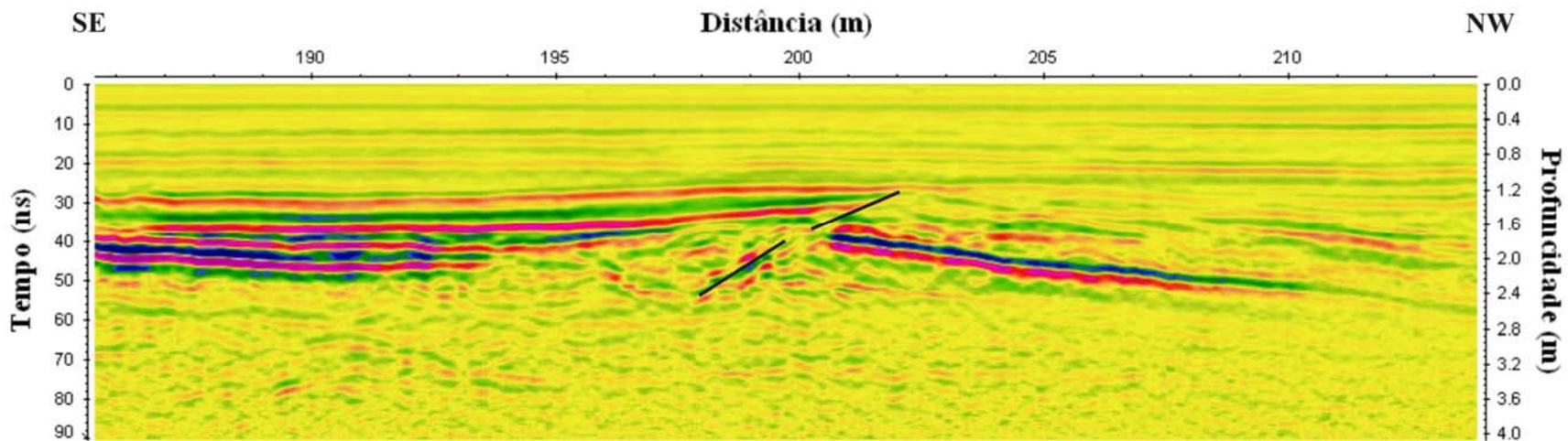


Figura 5.47 – Detalhe do perfil 11 sobre o intervalo de 186 a 213 m.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No perfil gravimétrico foi observada variação nos valores de gravidade da ordem de 40 miligals. Através dessa variação está sendo proposto um modelo de afinamento na crosta, fazendo com que o manto se aproxime da superfície. No modelo, a profundidade do manto varia de 20 km, na região onde foram registrados os maiores valores da gravidade, a 27 km, nos locais onde foram observados os menores valores de gravidade.

Nas regiões onde foram medidos os menores valores da gravidade, o perfil gravimétrico desenvolve-se sobre o embasamento e sobre rochas sedimentares do Terciário. Nessa região, entre os quilômetros 78 e 188, foi proposto um segundo modelo que sugere falhas no embasamento. De acordo com o modelo, essas falhas parecem ter provocado a formação de bacias com a espessura das rochas variando de poucos metros a 250 metros.

Os perfis de Radar mostraram diferentes resultados. Um deles foi a identificação litológica, principalmente a diferença entre rochas do embasamento e rochas sedimentares, que foram associadas respectivamente a um padrão descontínuo e aleatório das reflexões ou a um padrão de refletores contínuos, geralmente horizontalizados. Outro resultado obtido foi a identificação de feições que podem ser devidas à presença de canais. Diversas discontinuidades nos refletores foram associadas à existência de falhas ou fraturas e, em um perfil, foram interpretadas feições associadas a veios de quartzo, com base em observação geológica de superfície.

É importante observar que no estudo com o GPR foi utilizada uma antena de 200 MHz, o que proporciona pouca profundidade de penetração, porém boa resolução, permitindo uma análise mais detalhadas de pequenas discontinuidades superficiais, mas não uma análise de falhas maiores e profundas.

Para a continuação do trabalho, é recomendado fazer mais medidas gravimétricas, algumas em perfis perpendiculares a BR-156, para que se possam estabelecer modelos mais elaborados para o arcabouço sedimentar na área.

Com o GPR é interessante fazer medidas com outras antenas, principalmente antenas com menores frequências, como por exemplo, antenas com frequência menor ou igual a 80 MHz, para assim obter maiores profundidades de investigação.

Também, recomenda-se a utilização da magnetometria, para auxiliar no mapeamento das unidades litológicas na área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B. **The upper Precambrian of South America**. BOL. IG-USP, V.7, S.PAULO, 1976, v. 7, n. 3, p. 45-80. 1976.

ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar**, Workshop Notes. Mississauga, Ontário – L4W 3R7 – CANADA. 197 p. 2001.

ARANHA, P. R. A.; SOBREIRA, F. G. **Utilização do Geo-radar na identificação de feições associadas ao escorregamento ocorrido em Realeza, Manhuaçu MG**. Revista de Geologia (UFC), Fortaleza, v. 18, n. 2, p. 151-163. 2005.

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

CORDANI, U. G. et al. **Crustal evolution of the South American Platform**. In: Cordani, U. G.; Milani, E. J.; Filho, A. T.; Campos, D. A. (eds.) Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, 31° International Geological Congress, SBG. 2000.

COSTA, J. B. S. et al. Neotectônica da Região Amazônica: **Aspectos Estruturais, Tectônicos, Geomorfológicos e Depositionais**. Geonomos, Belo Horizonte, v. 4, n. 2, p. 23-44. 1996.

CPRM. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo**: Sistema de Informações Geográficas. Folha NA. 22 Macapá. CD-ROM. 2004.

DANIELS, D. J. **Surface-Penetrating Radar**. London: The Institution of Electrical Engineers, 300 p. 1996.

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

DELOR, C. et al. The Bakhuis Ultrahigh-Temperature granulite belt: II) **Implications for late Transamazonian crustal stretching in a revised Guiana shield framework**. Géologie de la France, França, v. 2-3-4, p. 207-230, 2003.

HASUI, Y.; HARALY, N. L. E.; SCHOBENHAUS, C. **Elementos geofísicos e geológicos da região amazônica**: subsídios para o modelo geotectônico. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 2, Manaus. Anais, SBG-NO, p.129-148. 1984.

KELLER, G. V. Rock and mineral properties, In: M. N. Nabighian, ed., Eletromagnetic methods in applied geophysics - Theory, pp. 13–51, **Society of Exploration Geophysics**. 1987.

- LUIZ, J. G. **Notas de Aulas de Método Georadar**. Belém: Universidade Federal do Pará, 8p. 1998.
- LUIZ, J. G; SILVA, L. M. C. **Geofísica de Prospecção**. Belém: Universidade Federal do Pará; Cejup, 311 p. 1995.
- MELO, M. S. **Geofísica aplicada à arqueologia**: Investigação no sítio histórico engenho Murucutu, em Belém, Pará. 100 p Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará. 2007.
- NOGUEIRA, F. C. C. et al. **Radar de penetração no solo (GPR) aplicado ao estudo de estruturas tectônicas neógenas na Bacia Potiguar, NE do Brasil**. Revista de Geologia (Fortaleza), Fortaleza, v. 18, n. 2, p. 139-149. 2005.
- NOGUEIRA, F. C. C.; BEZERRA, F. H. R.; CASTRO, D. L. **Deformação rúptil em depósitos da Formação Barreiras na porção leste da Bacia Potiguar**. Geologia USP. Série Científica, v. 6, p. 51-59. 2006.
- NOGUEIRA, F. C. C.; CASTRO, D. L. **Mapas gravimétricos do Estado do Ceará**. Revista de Geologia (UFC), v. 12, p. 69-80. 1999.
- OLIVEIRA, L. G. S.; NETO, M. A. M.; BARBOSA, M. S. C. Proposição de um modelo crustal para a região do Cone do Amazonas baseado em dados gravimétricos. Revista Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 31-42, 2003.
- PESTANA, R. C.; BOTELHO, M. A. B. Migration of ground-penetrating radar data with simultaneous topographic correction. **Rev. Bras. Geof.**, São Paulo, v. 15, n. 1. 1997.
- PINTO, L. G. R.; USSAMI, N.; SÁ, N. C. **Aquisição e interpretação de anomalias gravimétricas do Quadrilátero Ferrífero, SE do Cráton São Francisco**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, p. 21-30. 2007.
- REYNOLDS, J. M. **An Introduction to applied and environmental geophysics**. New York: John Willey & Sons, 796 p. 1997.
- ROBERTSON, E.C. **The interior of the Earth**; an elementary description: U.S. Geological Survey Circular 532, 10 pages, 1966.
- ROEVER, E. et al. The Bakhuis Ultrahigh-Temperature granulite belt: I) **petrological and geochronological evidence for a counterclockwise P-T path at 2.07-2.05 Ga.** Géologie de la France, França, v. 2-3-4, p. 175-206, 2003.

ROSA-COSTA, L. T. **Geocronologia $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, Sm-Nd, U-Th-Pb e $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ do Segmento Sudeste do Escudo das Guianas**: Evolução Crustal e Termocronologia do Evento Transamazônico. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, CG, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém. 2006.

SANTOS, J. O. S. **Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central**. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (eds.) *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília, CPRM, p. 169-226. 2003.

SILVEIRA, O. F. M.; SANTOS, V. F. **Aspectos geológicos-geomorfológicos da região costeira entre o rio Amapá Grande e a Região dos Lagos do Amapá**. In: I Workshop do Projeto Inventário Biológico das áreas do Sucurijú e Região dos Lagos no Estado do Amapá. Macapá. Boletim de Resumos. 2005.

TASSINARI, C. C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito Neves, B. B. (eds.) **Geologia do Continente Sul-Americano**: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, p. 471-485. 2004.

TALWANI, M.; WORZEL, J. C.; LANDISMAN, M. **Rapid gravity calculations for two-dimensional bodies with application to the mendocino submarine fracture zone**. *J. Geophys. Res.*, v. 64, n. 1, p. 49-59, 1959.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. Cambridge University Press; 2 edition. 792p. 1990.

WARD, S. H.; HOHMANN, G. W. **Electromagnetic theory for geophysical applications**, In: M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory*, pp. 131–311, Society of Exploration Geophysics. 1987.

ANEXOS

**ANEXO A – MEDIDAS DE GRAVIDADE E COORDENADAS GEOGRÁFICAS DAS
ESTAÇÕES GRAVIMÉTRICAS**

| <i>Estação</i> | <i>Altura</i> | <i>GmGAL</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|---------------|--------------|------------------|------------------|
| 01 | 3,95 | 1723.54 | 51° 10' 33.00" W | 00° 51' 24.00" N |
| 02 | 24 | 1719.69 | 51° 11' 39.49" W | 00° 51' 32.94" N |
| 03 | 34 | 1715.84 | 51° 11' 56.89" W | 00° 52' 05.22" N |
| 04 | 35 | 1717.94 | 51° 11' 58.37" W | 00° 53' 09.71" N |
| 05 | 55 | 1714.12 | 51° 11' 48.15" W | 00° 54' 12.22" N |
| 06 | 69 | 1710.90 | 51° 11' 28.63" W | 00° 55' 14.02" N |
| 07 | 68 | 1708.27 | 51° 11' 09.43" W | 00° 56' 15.66" N |
| 08 | 68 | 1707.39 | 51° 10' 26.18" W | 00° 56' 52.91" N |
| 09 | 58 | 1708.86 | 51° 09' 21.57" W | 00° 56' 51.22" N |
| 10 | 62 | 1709.37 | 51° 08' 23.29" W | 00° 57' 15.77" N |
| 11 | 63 | 1710.25 | 51° 07' 30.38" W | 00° 57' 51.53" N |
| 12 | 57 | 1711.39 | 51° 06' 47.63" W | 00° 58' 39.82" N |
| 13 | 46 | 1713.27 | 51° 06' 04.84" W | 00° 59' 28.26" N |
| 14 | 33 | 1716.66 | 51° 05' 33.48" W | 01° 00' 22.27" N |
| 15 | 12 | 1719.96 | 51° 05' 26.76" W | 01° 01' 24.82" N |
| 16 | 45 | 1712.77 | 51° 05' 28.55" W | 01° 02' 28.84" N |
| 17 | 46 | 1713.43 | 51° 05' 01.96" W | 01° 03' 26.48" N |
| 18 | 46 | 1712.00 | 51° 04' 18.01" W | 01° 04' 11.32" N |
| 19 | 52 | 1710.63 | 51° 03' 47.96" W | 01° 05' 07.71" N |
| 20 | 59 | 1709.66 | 51° 03' 19.49" W | 01° 06' 03.21" N |
| 21 | 62 | 1706.41 | 51° 02' 53.39" W | 01° 07' 01.06" N |
| 22 | 59 | 1705.02 | 51° 02' 47.91" W | 01° 08' 02.96" N |
| 23 | 52 | 1705.38 | 51° 02' 13.30" W | 01° 08' 55.22" N |
| 24 | 51 | 1704.97 | 51° 01' 33.92" W | 01° 09' 43.26" N |
| 25 | 51 | 1706.04 | 51° 01' 27.81" W | 01° 10' 45.55" N |
| 26 | 53 | 1703.50 | 51° 00' 51.80" W | 01° 11' 34.96" N |
| 27 | 48 | 1702.79 | 51° 00' 45.10" W | 01° 12' 36.03" N |
| 28 | 41 | 1702.79 | 51° 00' 30.76" W | 01° 13' 35.99" N |
| 29 | 36 | 1701.07 | 50° 59' 34.10" W | 01° 14' 07.35" N |
| 30 | 34 | 1701.75 | 50° 58' 56.92" W | 01° 14' 57.68" N |
| 31 | 31 | 1699.19 | 50° 58' 21.23" W | 01° 15' 48.27" N |
| 32 | 33 | 1696.65 | 50° 57' 44.71" W | 01° 16' 42.78" N |
| 33 | 32 | 1695.02 | 50° 57' 15.51" W | 01° 17' 39.39" N |
| 34 | 32 | 1694.75 | 50° 56' 35.58" W | 01° 18' 24.55" N |
| 35 | 29 | 1694.50 | 50° 55' 44.34" W | 01° 18' 52.14" N |
| 36 | 28 | 1692.62 | 50° 55' 37.00" W | 01° 19' 54.83" N |
| 37 | 24 | 1690.43 | 50° 55' 23.53" W | 01° 20' 54.74" N |
| 38 | 20 | 1688.02 | 50° 55' 28.65" W | 01° 21' 55.04" N |
| 39 | 23 | 1685.64 | 50° 55' 11.99" W | 01° 22' 54.98" N |
| 40 | 17 | 1686.57 | 50° 55' 31.27" W | 01° 23' 55.93" N |
| 41 | 27 | 1684.80 | 50° 55' 29.23" W | 01° 24' 25.84" N |
| 42 | 38 | 1684.08 | 50° 55' 32.27" W | 01° 24' 57.90" N |
| 43 | 29,2 | 1684.46 | 50° 55' 22.00" W | 01° 25' 27.00" N |
| 44 | 33 | 1686.76 | 50° 54' 54.28" W | 01° 25' 19.47" N |
| 45 | 32 | 1686.33 | 50° 54' 32.45" W | 01° 25' 27.78" N |
| 46 | 39 | 1687.13 | 50° 54' 17.90" W | 01° 25' 51.93" N |
| 47 | 39 | 1687.81 | 50° 53' 48.17" W | 01° 26' 04.49" N |
| 48 | 30 | 1688.46 | 50° 53' 22.64" W | 01° 26' 21.46" N |
| 49 | 22 | 1689.67 | 50° 53' 22.16" W | 01° 26' 53.17" N |

| | | | | |
|------|-------|---------|------------------|------------------|
| 50 | 21 | 1690.77 | 50° 53' 23.88" W | 01° 27' 24.16" N |
| 51 | 20 | 1691.34 | 50° 53' 38.03" W | 01° 27' 52.87" N |
| 52 | 23 | 1691.18 | 50° 53' 52.20" W | 01° 28' 21.54" N |
| 53 | 26 | 1693.65 | 50° 54' 10.15" W | 01° 28' 45.83" N |
| 54 | 25 | 1691.62 | 50° 54' 31.02" W | 01° 29' 05.63" N |
| 55 | 26 | 1686.20 | 50° 54' 31.73" W | 01° 29' 35.89" N |
| 56 | 18 | 1683.56 | 50° 54' 41.06" W | 01° 30' 06.62" N |
| Base | 13 | 1685.67 | 50° 54' 58.00" W | 01° 30' 34.00" N |
| 57 | 22 | 1684.31 | 50° 55' 02.54" W | 01° 31' 01.92" N |
| 58 | 22 | 1683.67 | 50° 55' 05.83" W | 01° 31' 33.93" N |
| 59 | 26 | 1683.35 | 50° 55' 03.45" W | 01° 32' 03.09" N |
| 60 | 22 | 1685.93 | 50° 54' 42.08" W | 01° 32' 27.51" N |
| 61 | 22 | 1685.81 | 50° 54' 18.49" W | 01° 32' 50.14" N |
| 62 | 22 | 1685.83 | 50° 54' 17.20" W | 01° 33' 21.71" N |
| 63 | 20 | 1684.63 | 50° 54' 15.05" W | 01° 33' 53.25" N |
| 64 | 18 | 1684.43 | 50° 54' 11.00" W | 01° 34' 25.22" N |
| 65 | 15,78 | 1683.05 | 50° 55' 38.00" W | 01° 34' 26.00" N |
| 66 | 20 | 1684.37 | 50° 54' 01.96" W | 01° 35' 22.93" N |
| 67 | 23 | 1683.46 | 50° 54' 18.80" W | 01° 35' 48.64" N |
| 68 | 23 | 1683.50 | 50° 54' 30.01" W | 01° 36' 18.90" N |
| 69 | 21 | 1684.12 | 50° 54' 44.18" W | 01° 36' 47.64" N |
| 70 | 18 | 1685.17 | 50° 54' 57.79" W | 01° 37' 16.48" N |
| 71 | 22 | 1685.94 | 50° 55' 02.22" W | 01° 37' 48.52" N |
| 72 | 21 | 1686.95 | 50° 55' 05.02" W | 01° 38' 20.63" N |
| 73 | 14 | 1689.26 | 50° 54' 55.23" W | 01° 38' 51.48" N |
| 74 | 18 | 1689.16 | 50° 54' 53.33" W | 01° 39' 21.84" N |
| 75 | 22 | 1688.44 | 50° 55' 09.63" W | 01° 39' 51.10" N |
| 76 | 22 | 1688.08 | 50° 55' 24.86" W | 01° 40' 19.24" N |
| 77 | 22 | 1686.90 | 50° 55' 33.16" W | 01° 40' 50.62" N |
| 78 | 15 | 1688.12 | 50° 55' 27.08" W | 01° 41' 18.10" N |
| 79 | 17 | 1686.15 | 50° 54' 59.10" W | 01° 41' 34.43" N |
| 80 | 19 | 1684.27 | 50° 54' 30.25" W | 01° 41' 46.42" N |
| 81 | 21 | 1682.47 | 50° 54' 03.60" W | 01° 42' 03.64" N |
| 82 | 20 | 1680.13 | 50° 53' 35.78" W | 01° 42' 19.35" N |
| 83 | 21 | 1679.22 | 50° 53' 12.98" W | 01° 42' 42.07" N |
| 84 | 16 | 1679.81 | 50° 52' 59.12" W | 01° 43' 11.20" N |
| 85 | 10 | 1681.15 | 50° 52' 45.07" W | 01° 43' 40.15" N |
| 86 | 9 | 1681.27 | 50° 52' 44.65" W | 01° 43' 57.50" N |
| 87 | 23 | 1681.30 | 50° 53' 04.12" W | 01° 44' 58.86" N |
| 88 | 20 | 1681.93 | 50° 52' 39.25" W | 01° 45' 52.29" N |
| 89 | 22 | 1681.66 | 50° 52' 41.82" W | 01° 46' 56.92" N |
| 90 | 25 | 1681.12 | 50° 52' 41.04" W | 01° 48' 00.09" N |
| 91 | 21 | 1681.74 | 50° 52' 35.21" W | 01° 49' 03.26" N |
| 92 | 24 | 1683.50 | 50° 52' 37.37" W | 01° 50' 06.05" N |
| 93 | 25 | 1683.69 | 50° 52' 33.98" W | 01° 51' 06.46" N |
| 94 | 22 | 1686.30 | 50° 52' 19.13" W | 01° 52' 07.73" N |
| 95 | 22 | 1689.18 | 50° 52' 09.76" W | 01° 53' 10.20" N |
| 96 | 17 | 1690.58 | 50° 52' 03.23" W | 01° 54' 14.06" N |
| 97 | 20 | 1691.25 | 50° 52' 16.03" W | 01° 55' 09.62" N |
| 98 | 14 | 1693.61 | 50° 51' 38.67" W | 01° 56' 00.31" N |
| 99 | 20 | 1693.82 | 50° 51' 47.81" W | 01° 57' 16.06" N |
| 100 | 17 | 1695.19 | 50° 51' 02.93" W | 01° 57' 41.10" N |
| 101 | 10 | 1699.70 | 50° 49' 22.15" W | 01° 59' 26.69" N |
| 102 | 10 | 1699.03 | 50° 47' 43.94" W | 02° 00' 34.60" N |
| 103 | 8,3 | 1700.29 | 50° 48' 00.00" W | 02° 03' 00.00" N |

ANEXO B – COORDENADAS GEOGRÁFICAS DAS POSIÇÕES DO GPR

Perfil 01

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 52' 32.74" W | 1° 49' 34.76" N |
| 02 | 50° 52' 32.53" W | 1° 49' 36.43" N |
| 03 | 50° 52' 32.08" W | 1° 49' 38.16" N |
| 04 | 50° 52' 32.00" W | 1° 49' 39.96" N |
| 05 | 50° 52' 31.86" W | 1° 49' 41.58" N |
| 06 | 50° 52' 31.81" W | 1° 49' 43.28" N |
| 07 | 50° 52' 31.83" W | 1° 49' 44.96" N |
| 08 | 50° 52' 32.10" W | 1° 49' 46.61" N |

Perfil 02

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 52' 34.60" W | 1° 49' 28.15" N |
| 02 | 50° 52' 35.11" W | 1° 49' 26.91" N |
| 03 | 50° 52' 36.10" W | 1° 49' 25.61" N |
| 04 | 50° 52' 36.80" W | 1° 49' 24.20" N |
| 05 | 50° 52' 37.18" W | 1° 49' 22.62" N |
| 06 | 50° 52' 37.44" W | 1° 49' 21.04" N |
| 07 | 50° 52' 37.67" W | 1° 49' 19.42" N |

Perfil 03

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 55' 24.01" W | 1° 45' 11.67" N |
| 02 | 50° 55' 22.70" W | 1° 45' 12.47" N |
| 03 | 50° 55' 21.38" W | 1° 45' 13.35" N |
| 04 | 50° 55' 20.05" W | 1° 45' 14.32" N |
| 05 | 50° 55' 18.73" W | 1° 45' 15.22" N |
| 06 | 50° 55' 17.28" W | 1° 45' 16.01" N |
| 07 | 50° 55' 15.93" W | 1° 45' 16.89" N |

Perfil 04

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 54' 45.67" W | 1° 45' 40.95" N |
| 02 | 50° 54' 46.88" W | 1° 45' 40.82" N |
| 03 | 50° 54' 48.16" W | 1° 45' 40.56" N |
| 04 | 50° 54' 49.15" W | 1° 45' 39.65" N |
| 05 | 50° 54' 50.04" W | 1° 45' 38.68" N |
| 06 | 50° 54' 51.01" W | 1° 45' 37.78" N |
| 07 | 50° 54' 52.02" W | 1° 45' 37.05" N |
| 08 | 50° 54' 53.06" W | 1° 45' 36.35" N |
| 09 | 50° 54' 54.16" W | 1° 45' 35.59" N |

Perfil 05

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 53' 04.82" W | 1° 44' 59.51" N |
| 02 | 50° 53' 04.36" W | 1° 44' 57.59" N |
| 03 | 50° 53' 03.77" W | 1° 44' 55.73" N |
| 04 | 50° 53' 03.28" W | 1° 44' 53.85" N |
| 05 | 50° 53' 02.83" W | 1° 44' 51.95" N |
| 06 | 50° 53' 02.30" W | 1° 44' 50.15" N |
| 07 | 50° 53' 01.64" W | 1° 44' 48.20" N |
| 08 | 50° 53' 01.04" W | 1° 44' 46.35" N |
| 09 | 50° 53' 00.62" W | 1° 44' 44.41" N |
| 10 | 50° 53' 00.07" W | 1° 44' 42.52" N |
| 11 | 50° 52' 59.44" W | 1° 44' 40.64" N |
| 12 | 50° 52' 58.79" W | 1° 44' 38.86" N |
| 13 | 50° 52' 58.17" W | 1° 44' 36.98" N |

Perfil 06

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 54' 6.49" W | 1° 35' 00.95" N |
| 02 | 50° 54' 6.90" W | 1° 34' 58.96" N |
| 03 | 50° 54' 7.38" W | 1° 34' 57.00" N |
| 04 | 50° 54' 7.91" W | 1° 34' 55.11" N |
| 05 | 50° 54' 8.67" W | 1° 34' 53.25" N |
| 06 | 50° 54' 9.59" W | 1° 34' 51.46" N |
| 07 | 50° 54' 10.52" W | 1° 34' 49.68" N |
| 08 | 50° 54' 10.73" W | 1° 34' 47.44" N |
| 09 | 50° 54' 10.83" W | 1° 34' 45.44" N |
| 10 | 50° 54' 10.84" W | 1° 34' 43.38" N |
| 11 | 50° 54' 10.87" W | 1° 34' 41.35" N |
| 12 | 50° 54' 10.89" W | 1° 34' 39.40" N |

Perfil 07

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 54' 13.07" W | 1° 34' 10.06" N |
| 02 | 50° 54' 13.28" W | 1° 34' 08.11" N |
| 03 | 50° 54' 13.63" W | 1° 34' 06.18" N |
| 04 | 50° 54' 13.96" W | 1° 34' 04.24" N |
| 05 | 50° 54' 14.34" W | 1° 34' 02.31" N |
| 06 | 50° 54' 14.83" W | 1° 34' 00.42" N |
| 07 | 50° 54' 15.19" W | 1° 33' 58.47" N |

Perfil 08

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 54' 48.90" W | 1° 32' 20.87" N |
| 02 | 50° 54' 50.21" W | 1° 32' 19.36" N |
| 03 | 50° 54' 51.55" W | 1° 32' 17.86" N |
| 04 | 50° 54' 52.82" W | 1° 32' 16.28" N |
| 05 | 50° 54' 54.11" W | 1° 32' 14.76" N |
| 06 | 50° 54' 55.48" W | 1° 32' 13.31" N |
| 07 | 50° 54' 56.70" W | 1° 32' 11.76" N |
| 08 | 50° 54' 57.92" W | 1° 32' 10.17" N |
| 09 | 50° 54' 59.19" W | 1° 32' 08.64" N |
| 10 | 50° 55' 00.54" W | 1° 32' 07.15" N |
| 11 | 50° 55' 01.86" W | 1° 32' 05.66" N |
| 12 | 50° 55' 03.21" W | 1° 32' 04.16" N |
| 13 | 50° 55' 04.52" W | 1° 32' 02.62" N |
| 14 | 50° 55' 05.81" W | 1° 32' 01.12" N |
| 15 | 50° 55' 07.10" W | 1° 31' 59.57" N |
| 16 | 50° 55' 08.36" W | 1° 31' 57.98" N |
| 17 | 50° 55' 09.65" W | 1° 31' 56.42" N |

Perfil 09

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 53' 47.10" W | 1° 28' 11.25" N |
| 02 | 50° 53' 47.46" W | 1° 28' 11.95" N |
| 03 | 50° 53' 47.84" W | 1° 28' 12.69" N |
| 04 | 50° 53' 48.21" W | 1° 28' 13.44" N |
| 05 | 50° 53' 48.58" W | 1° 28' 14.17" N |
| 06 | 50° 53' 48.90" W | 1° 28' 14.92" N |
| 07 | 50° 53' 49.21" W | 1° 28' 15.64" N |
| 08 | 50° 53' 49.59" W | 1° 28' 16.36" N |
| 09 | 50° 53' 49.97" W | 1° 28' 17.15" N |
| 10 | 50° 53' 50.27" W | 1° 28' 17.90" N |

Perfil 10

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 53' 24.35" W | 1° 26' 37.79" N |
| 02 | 50° 53' 24.46" W | 1° 26' 38.62" N |
| 03 | 50° 53' 24.46" W | 1° 26' 39.43" N |
| 04 | 50° 53' 24.44" W | 1° 26' 40.38" N |
| 05 | 50° 53' 24.55" W | 1° 26' 41.18" N |
| 06 | 50° 53' 24.54" W | 1° 26' 41.95" N |
| 07 | 50° 53' 24.50" W | 1° 26' 42.71" N |
| 08 | 50° 53' 24.48" W | 1° 26' 43.54" N |
| 09 | 50° 53' 24.34" W | 1° 26' 44.45" N |
| 10 | 50° 53' 24.20" W | 1° 26' 45.27" N |
| 11 | 50° 53' 24.07" W | 1° 26' 45.96" N |
| 12 | 50° 53' 23.88" W | 1° 26' 46.68" N |
| 13 | 50° 53' 23.72" W | 1° 26' 47.47" N |
| 14 | 50° 53' 23.57" W | 1° 26' 48.19" N |
| 15 | 50° 53' 23.37" W | 1° 26' 49.02" N |
| 16 | 50° 53' 23.15" W | 1° 26' 49.80" N |
| 17 | 50° 53' 22.97" W | 1° 26' 50.54" N |
| 18 | 50° 53' 22.79" W | 1° 26' 51.28" N |
| 19 | 50° 53' 22.59" W | 1° 26' 52.19" N |
| 20 | 50° 53' 22.36" W | 1° 26' 52.98" N |
| 21 | 50° 53' 22.11" W | 1° 26' 53.65" N |

Perfil 11

| <i>Estação</i> | <i>Longitude</i> | <i>Latitude</i> |
|----------------|------------------|-----------------|
| 01 | 50° 55' 31.08" W | 1° 23' 55.78" N |
| 02 | 50° 55' 31.45" W | 1° 23' 56.52" N |
| 03 | 50° 55' 31.87" W | 1° 23' 57.29" N |
| 04 | 50° 55' 32.27" W | 1° 23' 58.01" N |
| 05 | 50° 55' 32.56" W | 1° 23' 58.75" N |
| 06 | 50° 55' 32.93" W | 1° 23' 59.49" N |
| 07 | 50° 55' 33.25" W | 1° 24' 00.27" N |
| 08 | 50° 55' 33.51" W | 1° 24' 00.96" N |
| 09 | 50° 55' 33.81" W | 1° 24' 01.83" N |
| 10 | 50° 55' 34.01" W | 1° 24' 02.60" N |
| 11 | 50° 55' 34.29" W | 1° 24' 03.36" N |
| 12 | 50° 55' 34.55" W | 1° 24' 04.14" N |