



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

Eric Sandro Ferreira da Silveira

**INVESTIGAÇÃO COM OS MÉTODOS GPR E MAGNÉTICO  
DE URNAS FUNERÁRIAS  
DO SÍTIO NOSSA SENHORA DO PERPÉTUO SOCORRO (PARÁ)**

BELÉM

2012

Eric Sandro Ferreira da Silveira

**INVESTIGAÇÃO COM OS MÉTODOS GPR E MAGNÉTICO  
DE URNAS FUNERÁRIAS  
DO SÍTIO NOSSA SENHORA. DO PERPÉTUO SOCORRO (PARÁ)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em cumprimento as exigências para obtenção do título de mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Elétricos e Eletro-magnéticos.

Orientadora: Lúcia Maria da Costa e Silva.

BELÉM

2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

S587i Silveira, Eric Sandro Ferreira da

Investigação com os métodos GPR e magnético de urnas funerárias do sítio Nossa Senhora do Perpétuo Socorro (Pará) / Eric Sandro Ferreira da Silveira; Orientador: Lúcia Maria da Costa e Silva - 2012.

99 fl.: il.

Dissertação (mestrado em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2012.

1. Geofísica aplicada. 2. GPR. 3. Magnetometria. 4. Arqueologia. I. Silva, Lúcia Maria da Costa e, *orient.* II. Universidade Federal do Pará III. Título.

CDD 22° ed.: 550

---

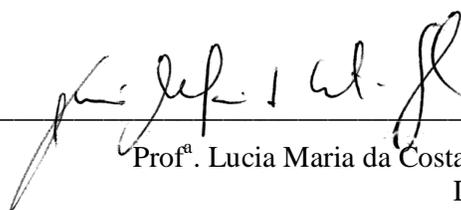
Eric Sandro Ferreira da Silveira

**INVESTIGAÇÃO COM OS MÉTODOS GPR E MAGNÉTICO  
DE URNAS FUNERÁRIAS  
DO SÍTIO NOSSA SENHORA DO PERPÉTUO SOCORRO (PARÁ)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em cumprimento as exigências para obtenção do título de Mestre em Geofísica

Data de aprovação: 21/09/2012

BANCA EXAMINADORA:



Prof.ª. Lucia Maria da Costa e Silva - orientadora  
Doutora em Geofísica  
Universidade Federal do Pará



Prof.ª Dra. Denise Pahl Schaan  
Doutora em Antropologia Social  
Universidade Federal do Pará



Prof.º. Marco Antonio Barsottelli Botelho  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal da Bahia

Dedico este trabalho aos moradores de Itaituba, lugar que gosto e já tive a oportunidade de ir mais de uma vez e espero um dia poder voltar.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais Admilson Freire da Silveira Junior e Norma Iracema Ferreira da Silveira, pois são base de minha educação.

Agradeço a prof<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Denise Pahl Schaan e ao LAANF por terem sido responsáveis por todas as despesas desse trabalho em campo, assim como toda a preparação logística.

Agradeço a Ezenildes Prado, que passionadamente se envolveu no trabalho.

Agradeço a prof<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia Maria da Costa e Silva pelo conhecimento repassado e por toda orientação, além de ser a idealizadora do tema e técnica da dissertação.

Agradeço a todos os professores do Curso de Graduação em Geologia e Pós-Graduação em Geofísica da UFPA pelo conhecimento transmitido ao longo destes sete anos de estudos.

Agradeço a todos os amigos da Pós-graduação, em especial Diógenes Leão e Gustavo Nogueira, que foram “braços” sem os quais a parte prática não teria sido realizada.

Agradeço ao CNPQ pela concessão da bolsa de Mestrado.

Agradeço a todas as críticas destrutivas e construtivas recebidas ao longo da elaboração dessa dissertação, pois de uma forma ou de outra, contribuíram para a conclusão do trabalho.

## RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados da aplicação de métodos geofísicos na eleição de áreas potenciais para salvamento arqueológico no Sítio Nossa Senhora do Perpétuo Socorro no estado do Pará. O Sítio possui urnas funerárias indígenas aflorantes e sub-aflorantes de bastante interesse arqueológico. Os métodos utilizados foram Magnetometria e Radar de Penetração no Solo (GPR). As medidas magnéticas foram utilizadas para indicar os locais mais apropriados para escavação reduzindo bastante as áreas potenciais. O GPR foi usado para confirmar as anomalias detectadas pelas medidas magnéticas e proporcionar uma melhor avaliação espacial tanto horizontal quanto verticalmente, diminuindo os erros cometidos quando se identificam anomalias magnéticas que não são causadas por feições arqueológicas. A metodologia de estudo baseou-se na comparação de anomalias obtidas em terrenos desconhecidos com terrenos onde comprovadamente havia a existência de elementos mapeáveis como urnas aflorantes e raízes, caracterizando e agrupando essas anomalias.

Palavras-chaves: Geofísica aplicada, GPR, Magnetometria, Arqueologia.

## **ABSTRACT**

This paper presents the results of the application of geophysical methods in the selection of potential areas for archeological site at Nossa Senhora do Perpétuo Socorro in the state of Pará. The site has urns indigenous outcropping and sub-outcropping plenty of archaeological interest. The methods used were Magnetometry and Ground Penetrating Radar (GPR). The magnetic measurements were employed to indicate the most appropriate sites for excavation greatly reducing the potential areas. The GPR was used to confirm the anomalies detected by magnetic measurements and provide a better spatial assessment both horizontally and vertically, reducing the errors when they identify magnetic anomalies that are not caused by archaeological features. The study methodology was based on comparison of anomalies obtained from unknown areas which anomalies from areas where exists urns and roots, characterizing and grouping these anomalies.

Key words: Applied geophysics, GPR, Magnetometry, Archaeology.

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
2	<b>O MÉTODO MAGNETOMÉTRICO</b> .....	20
2.1	INTRODUÇÃO.....	20
2.2	PRINCÍPIOS .....	21
2.3	O CAMPO GEOMAGNÉTICO .....	22
2.4	TIPOS DE MAGNETIZAÇÃO .....	24
2.4.1	<b>Magnetização das cerâmicas</b> .....	25
2.5	INSTRUMENTOS DE MEDIDA MAGNÉTICA .....	26
2.6	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	27
2.7	PROCESSAMENTO DE DADOS.....	29
3	<b>GPR</b> .....	31
3.1	INTRODUÇÃO.....	31
3.2	O MÉTODO GPR.....	32
3.2.1	<b>Princípios</b> .....	32
3.3	INSTRUMENTOS DE MEDIDAS .....	34
3.4	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	35
3.5	PROCESSAMENTO DE DADOS.....	35
4	<b>O SÍTIO NOSSA SENHORA DO PERPÉTUO SOCORRO</b> .....	40
4.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	40
4.2	AS URNAS .....	40
5	<b>PREPARAÇÃO DAS ÁREAS DE MEDIDA E ESTRATÉGIAS DE MEDIÇÃO</b> .....	45
5.1	ÁREA 1.....	45
5.2	ÁREA 2.....	51
5.3	ÁREA 3.....	53
6	<b>INVESTIGAÇÕES ADICIONAIS</b> .....	57
6.1	ESTUDO DE VELOCIDADE .....	57
6.2	ESTUDO SEDIMENTOLÓGICO .....	59
7	<b>PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO</b> .....	60
7.1	ÁREA 3.....	60
7.1.1	<b>GPR</b> .....	61
7.1.2	<b>Estudo de horizontes de solo</b> .....	73

7.1.3	<b>Magnetometria</b> .....	74
7.2	<b>ÁREA 1</b> .....	77
7.2.1	<b>GPR</b> .....	77
7.2.2	<b>Magnetometria</b> .....	80
7.3	<b>ÁREA 2</b> .....	86
7.3.1	<b>GPR</b> .....	86
8	<b>CONCLUSÕES</b> .....	89
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	90
	<b>ANEXOS</b> .....	95

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Representação do campo magnético terrestre e suas componentes. NG (Norte Geográfico). NM (Norte magnético). .....	23
Figura 2.2- Variação da intensidade geomagnética ao longo de 24 horas em um dia calmo (25/08/90) e em um dia com tempestade magnética (26/08/90) em estação (MAU) no Ceará. ....	24
Figura 2.3 - Comparação entre a precessão de um peão (esquerda) sob a ação da gravidade e um próton (direita) sob o efeito de um campo magnético vertical. ....	27
Figura 3.1 - Esquema básico de funcionamento para GPR biestático blindado.....	37
Figura 3.2 - Técnicas de aquisição. 1) Afastamento constante. 2) Ponto médio comum. 3a) e 3b) . ....	38
Figura 4.1 - Localização do sítio Nossa Senhora do Perpétuo Socorro. Topo: Município de Itaituba (vermelho) no estado do Pará. Centro: Sítio em relação ao centro da cidade de Itaituba. Base: Detalhe do sítio e proximidades. ....	41
Figura 4.2 - Casa do sítio Nossa Senhora do Perpétuo Socorro. ....	42
Figura 4.3 - Raízes aflorando nas proximidades do Rio Tapajós. ....	42
Figura 4.4 - Urna com diâmetro de aproximadamente 1 m, com sedimentos e restos de fragmentos. ....	43
Figura 4.5 - Aspecto de urna parcialmente escavada pela equipe do LAANF.....	44
Figura 4.6 - Urna aflorante. Setas indicam suas bordas aparentes. ....	44
Figura 5.1 - Áreas selecionadas. ....	46
Figura 5.2 - Sistema cartesiano local, para agilizar medidas e verificações futuras na área. Coordenadas $x, y$ do círculo vermelho: 0, 52. ....	46
Figura 5.3 - Área 1. ....	47
Figura 5.4 - Magnetômetro modelo M87C da Geotest. ....	47
Figura 5.5 - Variação diurna para o 1º dia de trabalho (21/05/2010). ....	48
Figura 5.6 - Índice DST em tempo real de Kyoto, Japão, para o mês de maio (World Data Centre for Geomagnetismo - WDC-C2). ....	48
Figura 5.7- Distribuição espacial das medidas magnéticas. ....	49
Figura 5.8- Sensor do magnetometro próximo ao chão. ....	50
Figura 5.9 - Equipamento SIR-SYSTEM 3000. Antena de 400MHz.....	50
Figura 5.10 - Distribuição espacial dos perfis de GPR na área 1. ....	51

Figura 5.11 - Distribuição espacial dos perfis de GPR e das medidas de Magnetometria na área 1. ....	51
Figura 5.12 - Área 2. ....	52
Figura 5.13 - Distribuição espacial dos perfis de GPR na área 2. ....	53
Figura 5.14 Urna aflorante. Seta vermelha indicando a borda. ....	54
Figura 5.15 – Área 3 preparada para o levantamento magnético. Cada quadricula possui 50 x 50 cm <sup>2</sup> . Setas vermelhas: interseções onde foram feitas as medidas. Círculos azuis: urnas aflorantes. ....	55
Figura 5.16 - Área 3 preparada para o levantamento GPR. ....	55
Figura 5.17– Distribuição espacial do perfis de GPR e das medidas de Magnetometria na área 3. ....	56
Figura 6.1- No centro, pé de cabra antes de ser coberto pelo solo. Linha pontilhada indica a posição de passagem do GPR. ....	57
Figura 6.2 - Radargrama referente ao teste de velocidade. ....	58
Figura 6.3 – Relações de profundidade entre os horizontes A, B e C. ....	59
Figura 7.1-Vista superior da área 1. Retângulo laranja: escavações anteriores Linha cheia vermelha: urnas aflorantes (1 e 2). Linha tracejada vermelha: possível urna enterrada (urna 3). ....	60
Figura 7.2 - Hipérbole grande e bem formada, associada a raízes de grande porte. ....	62
Figura 7.3 - Hipérbole pequena e mal formada associada a raízes de pequeno porte. ....	63
Figura 7.4 - Estrutura de contraste elevado no radargrama obtido no perfil 17N que passa pelo centro da urna 2. Setas pretas: bordas da urna. Seta azul: fundo da urna com aspecto de hipérbole invertida. ....	63
Figura 7.5 - Estrutura de contraste elevado no radargrama 17,25N que passa pela urna 2. Setas pretas: bordas da urna. Seta azul: fundo da urna com aspecto de hipérbole invertida. ....	64
Figura 7.6 - Estrutura de contraste elevado no radargrama 19N que passa pela urna 1. Setas pretas: bordas da urna. Seta azul: fundo da urna com aspecto de hipérbole invertida. ....	64
Figura 7.7 - Possível assinatura GPR para as urnas. Curvas em verde e vermelho tentando imitar variações de cores no radargrama. ....	65
Figura 7.8– Urna vista de topo à esquerda e como vista pelo GPR de perfil ao longo de três linhas. ....	65
Figura 7.9 - Radargramas 17,25 e 17 N. Seta azul: hipérboles de raiz de árvore. Caixa vermelha: urna 2. Seta verde: provável urna não aflorante. ....	65

Figura 7.10– Detalhe do perfil 17,5N mostrando provável urna não aflorante.....	66
Figura 7.11 - Linha pontilhada mostrando o final da zona de sombra do Georadar em trecho do perfil 17,25N. Seta preta: borda da urna 2.....	67
Figura 7.12 - Seções GPR superficial (esquerda) e a 3 cm de profundidade (direita). Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. ....	68
Figura 7.13 – Seções GPR a 6 e a 9 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente). Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Setas: Contrastes.....	68
Figura 7.14 – Seções GPR a 12 e a 16 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente).....	70
Figura 7.15 – Seções GPR a 19 e a 22 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente).Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna. ....	70
Figura 7.16 – Seções GPR a 25 e a 28 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente).....	71
Figura 7.17– Seções GPR a 31 e a 34 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente).Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna. ....	71
Figura 7.18– Seções GPR a 37 e a 40 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente). Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna. .	
Linha marrom, na seção a 40 cm de profundidade: sinais da raiz de grande porte.....	72
Figura 7.19– Seções GPR a 43 e a 46 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente). Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna. Linha marrom: sinais da raiz de grande porte. ....	72
Figura 7.20– Seção GPR a 48 cm de profundidade. Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna. Linha marrom: sinais da raiz de grande porte.....	73
Figura 7.21– Perfil esquemático do comportamento da raiz de grande porte, mudando de profundidade ao longo de sua trajetória. Linhas tracejadas pontilhadas mostram intercessão da raiz com diferentes profundidades.....	73
Figura 7.22 - Passagem do horizonte B para C comum em todos os radargramas em tracejado. ....	74
Figura 7.23 – Superposição de radargramas mostrando a passagem do horizonte A para o B. Tracejados marcam as interfaces entre os horizontes. Linha tracejada em marrom mostra raiz. ....	74

Figura 7.24 - Mapa de contornos de isovalores magnéticos da área 3. Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna. A e B seria, alto e baixo (respectivamente) isolados sem dados suficientes para afirmações e C seria ruído magnéticos de sieno granitos	75
Figura 7.25 – Sieno Granito. ....	76
Figura 7.26 - Seção GPR a profundidade de 10 cm (topo) e 12 cm (base). Amarelo: fachada da casa. Linha tracejada: separação entre área de maior e menor ação antrópica (áreas verde e azul, respectivamente).....	78
Figura 7.27 - Detalhe do radargrama obtido no perfil 60N mostrando a densidade de hipérboles. Em A com escala de cores e B com escala de tons de cinza. ....	79
Figura 7.28– Localização das hipérboles na área 1. ....	79
Figura 7.29 - Mapa de contornos de isovalores magnéticos da área 1. Círculos laranja: posição das urnas aflorantes a subaflorantes. Letras: zonas anômalas assinaladas por retângulos vermelhos. ....	80
Figura 7.30 - Mapa de contornos de isovalores magnéticos da área 1 com a escala ajustada para não enfatizar as anomalias ligadas a restos de rochas. Círculos laranja: posição das urnas aflorantes a subaflorantes. Letras: zonas anômalas assinaladas por retângulos vermelhos. ....	81
Figura 7.31 - Mapa de classificação das anomalias magnéticas sobre o mapa de isocontornos da área 1. ....	84
Figura 7.32 - Mapa de classificação das anomalias magnéticas sobre o mapa de isocontornos da área 1 com a escala ajustada para não enfatizar as anomalias ligadas a restos de rochas. ..	84
Figura 7.33 - Seleção de área para escavação dentro de zonas anômalas. ....	85
Figura 7.34 - Radargrama obtido sobre o 7º perfil (33N), mostrando a maior densidade de hipérboles. ....	87
Figura 7.35– Hipérbole pequena (tracejado preto) facilmente confundida com hipérbole provocada por urna. Tracejado vermelho: reverberação.....	87
Figura 7.36 - Mapa das localizações potencialmente favoráveis para a descoberta de urnas na área 2. Pontos: projeção na superfície do terreno das hipérboles selecionadas. Círculos em vermelho nas locações distantes de até 50 cm e em laranja nas locações distantes de 0,5 a 1 m. ....	88

## ÍNDICE DAS TABELAS

Tabela 3.1- Constante dielétrica $\epsilon_r$ , condutividade elétrica $\sigma$ , velocidade de propagação do pulso de radar $v$ e atenuação $\alpha$ para diferentes materiais. ....	36
Tabela 3.2 - Frequência central e respectiva profundidade estimada em diferentes áreas de aplicação.....	37
Tabela 4.1 - Proporções de algumas urnas. ....	43
Tabela 7.1 - Descrição das anomalias observadas nos mapas de isocontornos magnéticos 7.29 e 7.30. A cor cinza destaca as anomalias sem interesse por representarem ruído geológico (restos de rocha) e o símbolo  , anomalias geradas por cerâmica que serão excluídas da lista de anomalias geofísicas.....	82
Tabela 7.2 - Anomalias potencialmente favoráveis para a descoberta de utensílios arqueológicos.....	85

## 1 INTRODUÇÃO

A região amazônica foi ocupada há mais de 10.000 anos. Os mais antigos vestígios de ocupação humana na Amazônia foram encontrados em uma região próxima à cidade de Monte Alegre no Pará, vizinha de Santarém, e datados em 11.200 anos (ROOSEVELT et al. 1996). A partir do século XVII, contudo, quando europeus passaram a interagir mais acentuadamente com esses povos, muitos registros das antigas civilizações foram apagados ou se perderam (NEVES, 2006). É fundamental, portanto, para se recuperar a história do homem amazônico, recuperar vestígios antropogênicos do passado.

O trabalho na busca e resgate arqueológico pode ser bastante árduo. A região é vasta, o acesso pode ser extremamente difícil, a cobertura vegetal mais o intemperismo, por sua vez, mascararam os vestígios. Por outro lado, há a fragilidade e as condições do que se procura, a exemplo de cerâmicas que exigem cuidado especial durante as escavações e armazenamento, ou estruturas, como muros, fornos, pisos, fogueiras, poços e cavidades, que podem estar bastante soterradas devido à ação de ocupação posterior.

Os últimos vinte anos têm sido extremamente difíceis para aqueles que tentam realizar estudos arqueológicos na região, não só pelo desafio que a densa biodiversidade da região representa, mas também pela expansão desordenada da população bem como pela ocupação por grupos interessados nos atrativos econômicos da região (SCHAAN et al.2010).

De certa maneira, como ocorreu no século XVII, assiste-se a mais um movimento de extermínio das pistas arqueológicas que ainda existem.

Muitas vezes, a erosão ou a ocupação traz a tona artefatos ou pistas que tornam a área favorável a achados arqueológicos.

Durante a identificação e salvamento do patrimônio arqueológico nas rodovias BR-163 e BR-230, chegou ao conhecimento da equipe de Arqueologia do Laboratório de Antropologia Arthur Napoleão Figueiredo (LAANF) da Universidade Federal do Pará (UFPA) em 2009, o afloramento de urnas cerâmicas na chácara Nossa Senhora do Perpétuo Socorro, situada no município de Itaituba, às margens do rio Tapajós. A equipe do LAANF removeu treze dessas urnas.

O material removido ainda não foi estudado, de modo que a sua idade ainda é desconhecida, mas as suas características permitem inferir que se trata de urnas funerárias de enterramento com diâmetro variando de 20 a 75 cm e altura de cerca de metade do diâmetro.

As descobertas feitas a partir exclusivamente de indicações superficiais geradas pela ação antrópica (limpeza da propriedade) e pela alta pluviosidade trabalhando no relevo positivo mostraram a necessidade de dar continuidade aos trabalhos.

Mesmo nesses casos em que a erosão ou a ocupação revela o material arqueológico, o trabalho arqueológico é árduo, já que invariavelmente parte do material encontra-se sob a superfície. Uma ferramenta indispensável na atualidade ao trabalho arqueológico é, conseqüentemente, a Geofísica.

O grande mérito da Geofísica aplicada à Arqueologia está no uso de técnicas não destrutivas, que permitem a investigação e a avaliação de sítios arqueológicos sem comprometimento das relíquias que se encontram em subsuperfície, mostrando a localização e a profundidade de estruturas de pequenas dimensões, acelerando o trabalho. Em outras palavras, o mérito da Geofísica está na economia de tempo devido à eliminação de áreas sem interesse para a Arqueologia (LUIZ e SILVA, 1995).

Praticamente todos os métodos geofísicos podem ser aplicados à Arqueologia. Tradicionalmente, os Métodos da Magnetometria e da Eletrorresistividade tiveram uma larga aplicação. Na última década, contudo, o Método Eletromagnético conhecido como Radar de Penetração do Solo ou simplesmente GPR (*Ground Penetration Radar*) tem experimentado uma larga utilização. O método GPR possui a mais alta resolução dos métodos geofísicos, tornando-se eficaz na investigação de detalhes; além disso, permite uma rápida aquisição de dados.

O primeiro trabalho geofísico voltado à Arqueologia na Amazônia foi realizado nos sítios arqueológicos Areão e Teso na ilha Teso dos Bichos em Marajó com os métodos Magnetométrico e da Eletrorresistividade em 1977 por Alves e Lourenço (ALVES, 1979; ALVES e LOURENÇO, 1981). No sítio Areão foi usado somente o método magnético. No sítio do Teso foi usada Eletrorresistividade bem como Magnetometria. A Eletrorresistividade foi bem sucedida principalmente na localização da camada de ocupação e o método magnético, na localização de antigos locais de queima.

Posteriormente, em meados da primeira metade da década de 80, Roosevelt usou os métodos Magnetométrico, Eletroresistividade e GPR na ilha Teso dos bichos. O primeiro permitiu encontrar fornos de argila queimada. A Eletroresistividade auxiliou na delimitação da área total do sítio, bem como para indicar construções de terra em várias partes do Teso dos Bichos e algumas áreas fora do sítio. Finalmente, o GPR ajudou no estudo da estratigrafia do local e para localizar objetos (ROOSEVELT, 1991).

Barradas estudou com os métodos Magnetométrico e GPR o sítio Cacoal no Marajó. O mapa magnético indicou quatro anomalias significativas, duas das quais se mostraram potencialmente favoráveis nos registros obtidos com o GPR e revelaram uma espessa concentração de fragmentos cerâmicos (BARRADAS et al. 1999).

Bevan e Roosevelt (2003) realizaram diversos testes magnetométricos no sítio Monte Carmelo no Guajará, que se mostraram particularmente valiosos para as escavações de urnas funerárias.

Luiz et al. (2005) realizaram levantamento geofísico no sítio Domingos em Carajás (PA-AT-247) descoberto em 2000, que seria afetado pela instalação de projeto pra extração de cobre. O levantamento utilizou Magnetometria, Eletroresistividade e GPR (400 MHz) e permitiu o resgate de milhares de fragmentos cerâmicos e três vasilhas cerâmicas inteiras, sendo uma delas urna funerária.

Os Sítios Bittencourt, Jambuaçu e Jaburu no Pará foram estudados com Magnetometria, GPR e Radiometria (ARAGÃO et al.2005, 2006, 2010; LUIZ et al., 2007). A Magnetometria permitiu separar zonas potencialmente favoráveis a descobertas arqueológicas; o GPR foi capaz de identificar anomalias dentro das zonas favoráveis e separar as mais interessantes, para resgate arqueológico, e, finalmente, a Radiometria revelou diferentes espessuras da camada de TPA (Terra Preta de Alteração).

Marques (2004) utilizou o GPR no sítio Uriboça em Marituba, Pará, encontrando anomalias relacionadas a fornos e antigas alvenarias.

Melo (2007) estudou com magnetometria e GPR o engenho do Murucutu em Belém, localizando possíveis vestígios de ocupação.

Trabalhos diversos em várias regiões têm mostrado a utilidade da associação da Magnetometria com o GPR em trabalhos arqueológicos.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia dos métodos Magnético e GPR na detecção e na delimitação de urnas em condições aflorantes a sub-aflorantes em zona de elevado intemperismo na Chácara Nossa Senhora do Perpétuo Socorro, de modo a auxiliar os trabalhos de escavação arqueológica.

## 2 O MÉTODO MAGNETOMÉTRICO

### 2.1 INTRODUÇÃO

A origem da palavra magnetismo está ligada ao nome de uma antiga cidade Turca chamada Magnésia, rica em minério de ferro. O nome magnetismo surgiu na antiguidade devido às propriedades que algumas rochas tinham de atrair fragmentos de ferro, muito possivelmente devido ao seu conteúdo em magnetita, um dos minerais responsáveis por esse fenômeno (REZENDE, 2004). Na época, o fenômeno não era compreendido e, por isso, foi ligado a forças sobrenaturais.

Em 1600, William Gilbert publicou “De Magnete”, trabalho que trata das propriedades do ímã e do magnetismo, do campo magnético terrestre e trata a Terra como um grande ímã com seus polos magnéticos próximos aos polos de seu eixo de rotação.

O magnetismo, contudo, já era usado para a prospecção no final do século XVI (LUIZ e SILVA, 1995). Seu uso de forma sistemática só aparece, no entanto, no século XX.

O Método Magnetométrico (ou Magnético) ou Magnetometria é um dos métodos mais utilizados na prospecção, devido ao baixo custo e rapidez. É possível realizar medidas nos ambientes mais adversos como lugares alagados, impregnados de raízes, desnivelados ou cobertos por gelo. As medidas podem ser obtidas em levantamentos aéreos e marinhos para cobrir grandes áreas ou de forma minuciosa, em levantamentos terrestres em áreas menores. Sua aplicação é vasta como: prospecção mineral, petróleo, mapeamento geológico, arqueologia, etc.

Na Arqueologia, a Magnetometria pode ser utilizada na localização de artefatos de ferro, fornos para queima de argila, cerâmica, instrumentos especiais de pedra, construções, estradas, urnas funerárias e outros.

A Magnetometria começou a ser aplicada em Arqueologia pelo Laboratório de Pesquisa para Arqueologia e História da Arte de Oxford na Inglaterra, para encontrar fornos de produção de cerâmica com magnetização termoremanescente em 1958 (ARAGÃO, 2006).

## 2.2 PRINCÍPIOS

O desenvolvimento dos princípios do método neste trabalho foi realizado com auxílio dos trabalhos de JUCA (1973) e SILVA (1986).

A força magnética é expressa pela lei de Coulomb como:

$$\vec{F} = -\frac{1}{\mu} \frac{P_1 P_2}{r^2} \hat{r}, \quad 2.1$$

em que  $P_1$  e  $P_2$  são intensidades dos polos magnéticos,  $r$  é a distância entre os polos e  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio.

A intensidade do campo magnético  $\vec{H}$  no polo  $P_1$  em relação a  $P_2$  será:

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{P_1} = -\frac{1}{\mu} \frac{P_1 P_2}{r^2} \hat{r}. \quad 2.2$$

Minerais magnéticos como magnetita, hematita e maghemita nas cerâmicas, fornos e vasos sinterizados são responsáveis pela magnetização desses objetos já resfriados. A intensidade de magnetização  $\vec{M}$  é dada por:

$$\vec{M} = X_m \vec{H}, \quad 2.3$$

sendo  $X_m$  a suscetibilidade magnética. O sentido de  $\vec{M}$  pode ser indicado por valores positivos ou negativos de  $X_m$ , refletindo o sentido da intensidade de magnetização em relação ao campo.

Magnetização induzida é o tipo de magnetização que um material sofre sob a ação de um campo magnético externo devido ao alinhamento dos momentos de dipolos internos ao material. Esse alinhamento cria uma adição ao campo natural chamada de indução magnética  $\vec{B}$ , que é relacionado ao campo magnético  $\vec{H}$  através da equação:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad 2.4$$

em que  $\mu$  é a permeabilidade magnética do material.

No CGS, a suscetibilidade magnética  $X_m$  está relacionada à permeabilidade magnética  $\mu$  como segue:

$$\mu = 1 + 4\pi X_m . \quad 2.5$$

As distorções do campo magnético natural medidas durante a prospecção com o Método Magnético são diretamente ligadas à susceptibilidade magnética dos materiais em subsuperfície.

Substituindo-se a equação 2.5. na 2.4, obtém-se:

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M} . \quad 2.6$$

A equação 2.6 mostra que a indução magnética é diretamente proporcional ao campo magnético terrestre e à intensidade de magnetização adquirida.

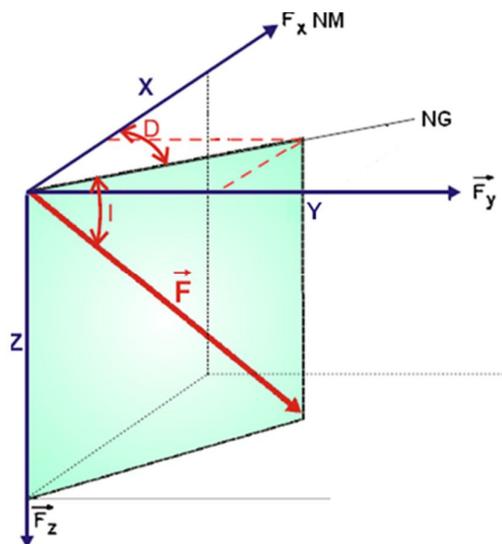
### 2.3 O CAMPO GEOMAGNÉTICO

O campo magnético terrestre é gerado pelas correntes elétricas que circulam no interior da Terra. Ele não se concentra somente no globo, mas se estende para o espaço, formando a magnetosfera. De uma forma simplificada, pode ser representado por um dipolo magnético colocado no centro da terra em que o norte magnético é próximo ao norte geográfico, o mesmo ocorrendo de forma análoga ao sul.

O campo magnético terrestre pode ser visto como um vetor  $\vec{F}$  que pode ser dividido nas componentes horizontal  $\vec{F}_h$  e vertical  $\vec{F}_z$  (Figura 2.1). A componente horizontal pode ser decomposta nas componentes norte  $\vec{F}_x$  e leste  $\vec{F}_y$ . Pode-se também definir diferentes ângulos entre as componentes, são eles: a inclinação **I** (ângulo de inclinação de  $\vec{F}$  com o plano horizontal) e a declinação **D** (ângulo entre a componente horizontal  $\vec{F}_h$  e o norte geográfico) (Figura 2.3.2).

A polaridade do campo magnético sofre reversão de modo cíclico em grandezas temporais de dezenas de milhares a milhões de anos. Recentemente, muitos filmes e cientistas apostam numa próxima inversão que acarretará catástrofes mundiais. Acredita-se que a última reversão ocorreu há 780.000 anos (GLATZMAIER, 2002). Em documentários feitos pela produtora *Discovery Channel* (documentário *Por Dentro do Planeta* exibido em 2010), vários estudiosos especulam que a próxima inversão se dará dentro de 1.500 anos.

Figura 2.1 - Representação do campo magnético terrestre e suas componentes. NG (Norte Geográfico). NM (Norte magnético).



Fonte: Teixeira, 2000

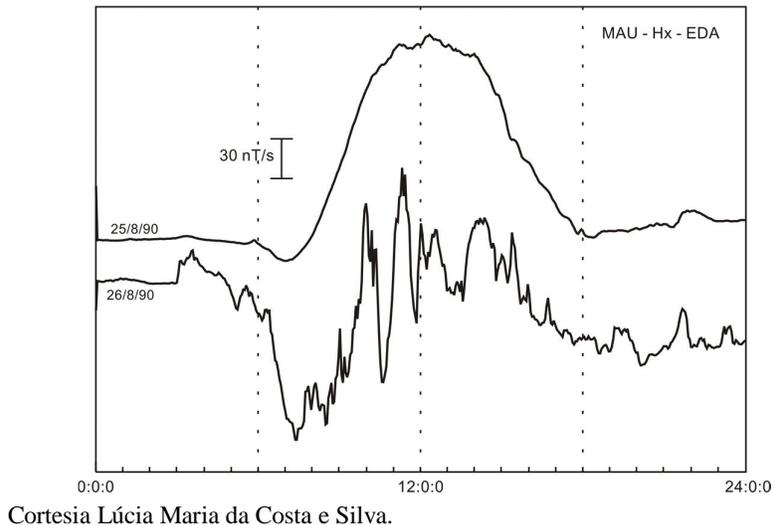
O campo magnético sofre outras importantes variações ao longo do tempo. São elas: a variação secular, a variação diurna e as tempestades magnéticas, sendo as duas últimas importantes em trabalhos de prospecção geofísica.

A variação diurna tem a sua maior intensidade neste trabalho por volta das 11 horas da manhã (Figura 2.2 topo). Essas variações são provocadas por movimentos naturais da ionosfera com o plasma solar, devido ao seu aquecimento no lado voltado ao Sol e ao seu resfriamento no lado oposto. Elas atingem dezenas de nT (nanotesla).

As tempestades magnéticas (Figura 2.2 base), por sua vez, podem ocorrer até cerca de três vezes por dia. Elas são geradas pela interação entre emissões intensas do plasma solar e o campo geomagnético. Podem atingir grande amplitude (até 1000 nT).

Os dados obtidos devem ser corrigidos da variação diurna. Durante as tempestades magnéticas, o levantamento de dados deve ser suspenso.

Figura 2.2- Variação da intensidade geomagnética ao longo de 24 horas em um dia calmo (25/08/90) e em um dia com tempestade magnética (26/08/90) em estação (MAU) no Ceará.



#### 2.4 TIPOS DE MAGNETIZAÇÃO

As principais causas de variações locais nas medidas do campo magnético se devem a materiais em subsuperfície e podem ser de dois tipos: magnetização induzida e magnetização permanente, remanescente ou remanente.

A magnetização induzida é gerada pelo campo atual da Terra.

A magnetização permanente refere-se à magnetização de materiais adquirida ao longo de sua história. Permite, por exemplo, que as rochas ígneas, ao terem seus minerais magnéticos orientados durante a fase de solidificação, gravem informações sobre o campo geomagnético da época em que se formaram. A magnetização permanente revela a história do magnetismo terrestre. Ela é estudada pelo Paleomagnetismo (MIRANDA, 2009).

A magnetização permanente pode ser classificada de acordo com sua causa em: termoremanente, química, deposicional, viscosa e isotérmica.

Na magnetização termoremanente, o material é aquecido e o momento de dipolo dos minerais magnéticos se alinha com o campo magnético da Terra. Esse material tende a ter uma “assinatura” permanente, que em alguns casos auxilia na datação do material. Este tipo de magnetização é muito importante, pois é comum em anomalias perceptíveis em levantamentos magnéticos sobre rochas ígneas ou artefatos cerâmicos como urnas, vasos e

fornos, podendo até gerar magnetizações fortes mesmo em campos externos fracos (AITKEN, 1974).

A magnetização química ocorre na formação de minerais magnéticos por uma reação química, como a oxidação de minerais magnéticos, sendo que esta oxidação pode acontecer tanto em baixas temperaturas (abaixo de cerca de 300° C) quanto a altas temperaturas (aproximadamente acima de 500° C). Este tipo de magnetização pode ocorrer, por exemplo, durante a formação de rochas metamórficas e sedimentares bem como com rochas vulcânicas, quando durante o resfriamento das mesmas ocorrem mudanças químicas nos seus minerais magnéticos (SOUZA, 1986).

Na magnetização remanescente deposicional, as partículas magnéticas minúsculas se depositam em direção preferencial em relação ao campo magnético externo. Neste processo a força magnética externa tende a vencer forças como a força de empuxo, o que implica em um ambiente com a presença de água, chegando a rotacionar as partículas (CALLISTER, 2002).

Na magnetização remanescente viscosa há uma exposição prolongada a um campo externo, sendo o aumento de magnetização remanescente uma função logarítmica do tempo. Aparece com mais frequência em rochas de grão fino do que em rochas de grão mais grosseiro (MIRANDA, 2009).

Na magnetização remanescente isotérmica há uma exposição do material a um campo externo alto e sua subsequente remoção rápida em temperatura ambiente. O campo geomagnético da terra geralmente não tem capacidade de gerar tal fenômeno, que é associado a descargas elétricas de raios em rochas expostas. A área de atuação dessa magnetização é pequena, cerca de algumas dezenas de metros quadrados (SILVA, 1986).

#### 2.4.1 Magnetização das cerâmicas

A argila é um dos materiais mais utilizado para a confecção de materiais cerâmicos, como vasos, e diversos objetos como tijolos, fornos e urnas funerárias. Os materiais cerâmicos sofrem aquecimento a ponto de haver sinterização e reorganização dos minerais internos, fazendo com que sua magnetização antes sem orientação assumia a direção do campo magnético regional na ocasião da sua queima. O aquecimento não altera a quantidade de elementos magnéticos presente na argila, mas os organiza de forma a criar um campo magnético perceptível.

Determinados tipos de materiais arqueológicos podem preservar tanto o registro da direção do campo dessa magnetização termoremanescente, se não foram movimentadas posteriormente, e também da intensidade do campo. Cada vez que o material é reaquecido, ele adquire uma nova magnetização térmica, de forma que o evento registrado no material é aquele do último aquecimento. Em alguns casos é até possível a datação arqueomagnética, que é realizada através da comparação de uma curva de referência para a variação secular com os dados arqueomagnéticos obtidos em artefatos de idade desconhecida (HARTMANN, 2007).

Para o tipo de alvo do presente trabalho, isso não seria possível, pois se tratam de objetos que foram confeccionados em uma posição e transferidos posteriormente para as mais diversas posições. Resta-lhes, contudo, magnetização cuja intensidade pode ajudar na sua localização.

## 2.5 INSTRUMENTOS DE MEDIDA MAGNÉTICA

Na prospecção magnética é possível medir a intensidade do campo magnético através de equipamentos conhecidos como magnetômetros. Há diferentes tipos, como: precessão de prótons, *flux-gate* e bombeamento ótico descritos por Luiz e Silva (1995).

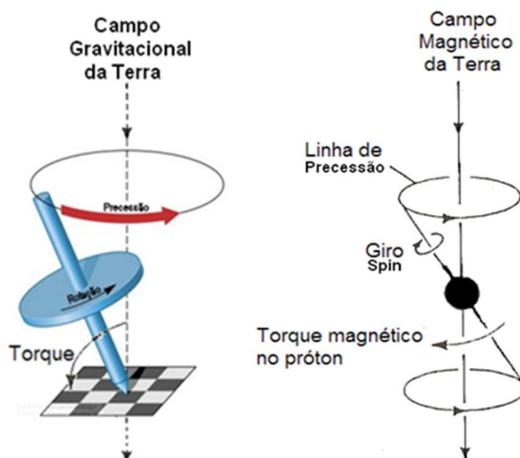
Nesta pesquisa foi utilizado o magnetômetro de precessão de prótons, que é um instrumento que contém uma substância como fonte de prótons, podendo ser água, metanol, álcool etílico, querosene ou similares. A substância é submetida a um campo magnético artificial intenso (50 a 100 oersted) e perpendicular ao campo geomagnético. Os prótons são polarizados segundo a resultante do campo artificial e do geomagnético, que, como o campo artificial é muitas vezes superior ao geomagnético, é virtualmente paralela ao campo artificial. Quando o campo é desligado, os prótons tendem a se alinhar novamente com o campo geomagnético que se deseja medir. Cada próton na verdade será girado através de um torque, alinhando o seu momento magnético ao campo geomagnético. Esse torque associado ao movimento de *spin* de rotação do próton acaba levando o próton a um movimento de precessão parecido com o de um pião sob a influência da gravidade (conhecida como frequência de precessão de Larmor) (Figura 2.3).

Como

$$\omega = \gamma_p \vec{F} , \quad 2.7$$

sendo  $\omega$  a frequência de precessão de Larmor e  $\gamma_p$  a razão giromagnética do próton ( $=26.751,3$  radianos/segundo.oersted), a intensidade do campo magnético total  $\vec{F}$  pode ser determinada medindo-se  $\omega$  com contador eletrônico.

Figura 2.3 - Comparação entre a precessão de um peão (esquerda) sob a ação da gravidade e um próton (direita) sob o efeito de um campo magnético vertical.



Fonte : Modificada de Melo (2007).

Esse tipo de magnetômetro mostra uma precisão de 1 nT, podendo realizar medidas de 20.000 a 100.000 nT e variações de gradiente de até 5.000 nT/m (GALLAS, 2004). A desvantagem deste equipamento está em seu registro descontínuo que necessita de segundos entre as leituras. Objetos condutores como trilhos, cercas de arames, tubulações, linhas de alta tensão, entre outros, podem afetar seu campo, impondo, portanto, ruídos aos dados.

## 2.6 AQUISIÇÃO DE DADOS

Medidas com o Método Magnético podem ser obtidas em levantamento aéreos, marinhos e terrestres. Nos levantamentos terrestres regionais, as medidas magnéticas geralmente são tomadas ao longo de rio e estradas com estações variando de 1 a 10 km; nos levantamentos de detalhe, o espaçamento das medidas diminui para 10 a 100 m e, finalmente, em trabalhos de Arqueologia ou de proteção ambiental, as medidas podem ser realizadas a intervalos de até 0,50 m.

Em levantamentos terrestres, o mais comum é medir o campo total com o magnetômetro de precessão ou sua componente vertical com o *flux-gate*; em alguns casos, é medido o gradiente do campo com gradiômetros ou por meio da variação de altura do magnetômetro em relação ao solo.

Em magnetômetros digitais, 3 a 5 medidas devem ser feitas, verificando-se a disparidade entre elas e uma média deve ser tomada entre os valores obtidos para maior confiabilidade dos dados.

Alguns cuidados devem ser tomados durante a etapa de aquisição de dados e entre a mais relevante está o registro da variação diurna, que corresponde à variação do campo magnético da Terra ao longo do dia, mostrada na Figura 2.2 (topo). Sem essa correção os dados podem ou não ser válidos ou mascarar anomalias desejadas ou até mesmo gerar falsas anomalias.

Para registrar a variação diurna é necessário eleger uma estação onde será medida a variação do campo magnético por um magnetômetro a cada cerca de 15 minutos, enquanto o outro percorre as estações de medida. Se somente um magnetômetro estiver sendo usado, ele deverá se deslocar até a estação base a cada 15 minutos a 2 horas para realizar medidas que permitam controlar a variação diurna; entre os intervalos de medição, a variação das medidas é tomada como linear. A estação base é escolhida em um local livre de anomalias, com pouca ou quase nenhuma variação das medidas. Medidas na base e nas estações devem ser acompanhadas da anotação com exatidão do tempo em que foram realizadas para permitir a correção da variação diurna.

Existem diversos fatores que podem vir a causar interferências nos trabalhos de campo, vários das quais podem ser corrigidos na fase de processamento dos dados, caso da variação diurna do campo geomagnético, já abordada. Há, contudo, fontes de interferência para as quais não existe correção e, por isso, deve ser evitada a aquisição dos dados próximos às mesmas, se possível, ou feita a aquisição e registrada as posições dessas fontes de interferência, quando as posições dessas fontes são conhecidas ou reveladas durante a campanha de campo. Entre essas fontes encontram-se o ruído geológico, o ruído cultural, o ruído instrumental e o ruído operacional.

O ruído geológico diz respeito à presença de ocorrências de minerais e rochas que podem mascarar as indicações procuradas sobre a subsuperfície, como a presença de rochas ígneas ou metamórficas, cujos efeitos podem ocultar anomalias associadas às feições

subsuperficiais procuradas ao sobreporem-se às mesmas com uma intensidade superior bem como misturarem-se às anomalias procuradas, tornando difícil eleger as anomalias de interesse.

O ruído cultural pode ocorrer mais pontualmente, como é o caso de estruturas de ferro (como ferrovias, cercas metálicas e artefatos metálicos diversos) bem como redes elétricas e telefônicas.

O ruído instrumental está relacionado ao mau funcionamento do aparelho, enquanto o ruído operacional, a problemas durante a operação do mesmo. No primeiro caso, estão os ruídos devidos ao equipamento danificado (equipamentos antigos ou sem manutenção frequente) e uso de pilhas sem voltagem suficiente. Ruídos operacionais ocorrem, por exemplo, quando o sensor é usado em posição inadequada, comum em áreas de topografia.

## 2.7 PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados geofísicos brutos obtidos em campo são, comumente, submetidos a operações conhecidas como processamento dos dados, realizados a fim de torná-los mais apropriados para a interpretação. Entre as operações que melhoram a qualidade dos dados estão as operações de correção dos dados e filtragem, largamente usados com os dados magnéticos. (LUIZ e SILVA, 1983, 1995)

As medidas magnéticas são afetadas pela variação diurna do campo geomagnético, topografia e latitude do local, que podem ser corrigidas.

A variação diurna pode ser corrigida somando-se ou subtraindo-se a variação do campo observada no magnetômetro fixo, para o momento de medida; o valor é somado se o campo na estação fixa diminui e subtraído se ocorrer o inverso.

Devido a grandes desníveis topográficos, variações no campo local surgem por causa de diferentes volumes de massa que podem ou não conter mais ou menos material magnético. A correção dessas variações exige o conhecimento acurado da topografia da região.

A correção de latitude é feita através de cartas do campo geomagnético representado pelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*), subtraindo-se da medida os valores do campo magnético normal da terra (IGRF) (LUIZ e SILVA, 1983).

Em áreas muito pequenas sem diferenças topográficas marcantes, a correção topográfica e de latitude se tornam dispensáveis, como é o caso da área levantada.

Na filtragem há uma série de filtros possíveis de serem utilizados, entre os quais o filtro de redução ao polo. O caráter dipolar do campo magnético terrestre faz com que a direção e a intensidade do campo variem ao longo da superfície terrestre. A variação da forma das anomalias resultantes torna complexa a sua interpretação. A redução ao polo transforma uma anomalia obtida em um ponto qualquer no globo em uma anomalia obtida no polo norte magnético, onde o campo tem a direção vertical, o que faz com que o centro da anomalia coincida com a sua fonte (SILVA, 1986).

Como as medidas indicadoras de cerâmica trazem consigo a magnetização termoremanente, as anomalias podem ser altos, baixos ou dipolos, de acordo com o posicionamento do destino final desses objetos, alvo deste trabalho. A redução do polo carece, no caso, de sentido. A interpretação é, conseqüentemente, complexa.

Os filtros de derivada vertical são usados para amplificar a informação de comprimentos de ondas curtas em detrimento dos comprimentos longos (filtro passa-alta). Geralmente, a primeira ou a segunda derivada acentuam os gradientes nas bordas de corpos magnéticos rasos (BLUM, 1999). Devido à área de trabalho ser muito restrita espacialmente e os alvos sub-aflorantes a aflorantes, as medidas já revelam basicamente a informação de comprimento de onda curto (frequência alta).

### 3 GPR

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Christian Hülsmeier, em 1904, teria sido o primeiro a utilizar a metodologia GPR para a localização de objetos enterrados (DANIELS, 1996). A primeira patente é de Hülsenbeck e data de 1926. Em 1929, o alemão W. Stern realizou a primeira investigação com o GPR, cuja finalidade era determinar a espessura de uma geleira na Áustria (OLHOEFT, 1996). Em 1950, aviões da Força Aérea Americana com equipamentos com o princípio do GPR foram utilizados para verificar a espessura e as zonas de ruptura de geleiras na Groenlândia (OLHOEFT, 1996). O uso comercial do GPR, no entanto, surgiu a partir de 1970, quando Rex Morey e Art Drake iniciaram a venda comercial do sistema do radar de penetração do solo (DAVIS e ANNAN, 1989).

Hoje, existem variadas referências que abrangem desde a construção de unidades de GPR à obtenção, processamento e análise de dados GPR. Métodos de apresentação e processamento dos dados que já estavam disponíveis antes em outras áreas foram adaptados para o trabalho de GPR. Uma destas tecnologias permite visualizar os dados GPR em três dimensões, podendo o tempo ser a quarta dimensão, o que ajuda, por exemplo, a visualizar o movimento de plumas contaminantes em subsuperfície (SMEMOE, 2000).

Muitos trabalhos em diversas áreas do conhecimento utilizam o GPR como ferramenta de aquisição. Em Arqueologia, ilustram o uso do GPR vários trabalhos citados anteriormente, como Roosevelt (1991), Barradas(1999), Aragão et al. (2005, 2006 e 2010) e Luiz et al.(2007), Marques (2004) e Melo (2007).

## 3.2 O MÉTODO GPR

### 3.2.1 Princípios

O GPR é um método eletromagnético que aplica ondas de alta frequência para detectar feições rasas em subsuperfície. Uma antena transmissora, colocada na superfície do terreno a ser investigado, envia pulsos que refletem nas feições geológicas subsuperficiais e são recebidos pela antena receptora também na superfície do terreno. As leituras de cada reflexão são gravadas em função do tempo de percurso. Uma imagem de alta definição da subsuperfície chamada radargrama é gerada a partir do tempo de propagação da onda refletida. A velocidade de propagação de uma onda é diretamente influenciada pela frequência do pulso transmitido e das diferentes propriedades elétricas dos diferentes materiais em subsuperfície (resistividade, constante dielétrica e susceptibilidade magnética).

Como o GPR é um método que utiliza altas frequências (> 1MHz), nesse caso tanto correntes de condução quanto correntes de deslocamento devem ser consideradas.

A partir das equações de Maxwell obtém-se a equação da onda para o campo elétrico  $\vec{E}$

$$\nabla^2 \vec{E} = (\omega^2 \mu \epsilon - i \mu \sigma \omega) \vec{E}, \quad 3.1$$

que mostra que o campo elétrico está relacionado com as propriedades intrínsecas das rochas (condutividade elétrica  $\sigma$ , permissividade dielétrica  $\epsilon$  e permeabilidade magnética  $\mu$ ) e a frequência angular  $\omega$ .

O termo que multiplica  $\vec{E}$  na equação 3.1 é conhecido como número de onda  $K$ :

$$K^2 = \omega^2 \mu \epsilon - i \mu \sigma \omega, \quad 3.2$$

Os primeiro e o segundo termo na equação 3.2 estão ligados à propagação e à atenuação da onda, respectivamente.

$K$  pode ser escrito como :

$$K^2 = \alpha - i\beta, \quad 3.3$$

em que  $\alpha$  e  $\beta$  são dados por (ORELLANA, 1974):

$$\alpha = \omega \left\{ \left( \frac{\mu \varepsilon}{2} \right) \left[ \left( 1 + \frac{\sigma^2}{\sigma^2 \varepsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} e \quad 3.4$$

$$\beta = \omega \left\{ \left( \frac{\mu \varepsilon}{2} \right) \left[ \left( 1 + \frac{\sigma^2}{\sigma^2 \varepsilon^2} \right)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2} . \quad 3.5$$

A solução da equação 3.2 é dada por:

$$\bar{E}_z = \bar{E}_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} , \quad 3.6$$

sendo  $\bar{E}_0$  a intensidade do campo elétrico inicial durante a transmissão,  $z$  a profundidade e  $\bar{E}_z$  a intensidade do campo elétrico resultante no meio.

A velocidade média da onda  $v_m$  em um determinado meio é diretamente proporcional à velocidade da luz no vácuo  $c$  ( $=300 \text{ m}/\mu\text{s}$ ) e inversamente proporcional às propriedades do meio:

$$v_m = \frac{c}{\sqrt{\frac{\varepsilon_r \mu_r}{2} \frac{1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2}}{1}}} , \quad 3.7$$

em que  $\varepsilon_r$  é a constante dielétrica e  $\mu_r$ , a permeabilidade magnética relativa (em materiais não magnéticos igual a 1).  $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}$  é chamado fator de perda.

As equações 3.2 e 3.7 mostram que a permeabilidade magnética influencia tanto na propagação quanto na atenuação da onda, assim como em sua velocidade. No campo, a influência da permeabilidade é mínima, a não ser que haja uma concentração anômala de minerais magnéticos (LUIZ, 1998).

Em terrenos de condutividade muito baixa, trabalhando-se com frequências muito elevadas, pode-se considerar o fator de perda próximo a zero. Se o terreno não é magnético  $\mu_r$  tende a 1. A equação 3.7 é simplificada para:

$$v_m = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} . \quad 3.8$$

Diferentes camadas, elementos geológicos ou objetos significativos possuem diferentes permissividades elétricas criando contraste na velocidade de reflexão da radiação eletromagnética incidente. Quanto maior o contraste, mais a energia será refletida. A proporção de energia refletida entre dois meios é determinada pelo contraste de velocidade ou pelo contraste de permissividade elétrica em que é o coeficiente de reflexão  $R$  dado por:

$$R = \frac{(v_1 - v_2)}{(v_1 + v_2)} \text{ ou} \quad 3.9$$

$$R = \frac{(\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}})}{(\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}})} , \quad 3.10$$

em que 1 e 2 referem-se a meios 1 e 2, respectivamente.

A Tabela 3.1 apresenta alguns materiais e dados sobre os mesmos.

Materiais de alta condutividade absorvem a onda, dificultando a penetração do sinal. Esse fator é ampliado muitas vezes pela ação da água, pois como visto na Tabela 3.1, o valor da constante dielétrica muda significativamente em um mesmo material ou litologia quando há a presença de água. A presença de eletrólitos dissolvidos na água também aumenta a constante dielétrica. A Tabela 3.2 temos alguns exemplos de profundidade de penetração relacionados a diferentes frequências do GPR e suas diferentes aplicações.

### 3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIDAS

O sistema GPR é composto por três elementos principais: 1) unidade de controle (computador); 2) antena e 3) fonte de energia (Figura 3.1).

O funcionamento do GPR é baseado em emissão do sinal eletromagnético e recepção do sinal refletido em subsuperfície e seu posterior armazenamento em uma unidade de dados para, se necessário, seu posterior tratamento. Quando as antenas estão acopladas em um mesmo módulo (equipamento), o sistema é chamado de monoestático. Quando as antenas estão separadas de tal forma que a distância entre antena transmissora e antena receptora (Rx) pode variar, o sistema é chamado de biestático. O primeiro sistema é o mais prático, pois evita

deslocamentos errados se o objetivo é manter espaçamentos equidistantes e é operado por somente duas pessoas.

### 3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

As técnicas de aquisição podem ser divididas em três (Figura 3.2): 1) Afastamento constante, podendo o sistema ser tanto biestático como monoestático; 2) Ponto médio comum (*Common Mid Point*), em que as antenas são deslocadas simetricamente a um ponto comum e, finalmente, 3) WARR (*wide angle reflection and refraction*), que funciona colocando-se uma das duas antenas fixa e movimentando-se a outra e geralmente é usada para o estudo de velocidade de onda em um meio através do ângulo de reflexão.

### 3.5 PROCESSAMENTO DE DADOS

Nem sempre os dados adquiridos em campo mostram claramente a informação pretendida. Para facilitar sua interpretação é, conseqüentemente, feito o seu processamento. Vários trabalhos resumem etapas do processamento (ALMEIDA, 2007 e NASCIMENTO, 2009).

Primeiramente é realizado o pré-processamento, em que é feita uma avaliação e reorganização geral dos dados coletados e correções de possíveis erros de amostragem, etc. Nesta etapa é feita a correção do tempo-zero (estática), que visa eliminar variações referentes ao primeiro registro da onda, relacionado à onda direta pelo trajeto ar-solo. Após essa correção, de cada traço (scan ou amostragem) é eliminada a parte sem registro e o tempo zero passa a coincidir com o topo do terreno.

Em seguida é aplicado o ganho, para ampliação do sinal de modo a realçar refletores em profundidade já que em alguns terrenos a onda é rapidamente atenuada. Esta etapa pode ser aplicada em diferentes momentos do processamento, já que pode alterar a eficácia de filtros.

A etapa seguinte consiste na aplicação de filtros. Conhecendo-se as estruturas que se deseja enfatizar em subsuperfície, é possível filtrar o sinal de acordo com sua intensidade (filtros de passa alta e baixa) e a sua posição espacial (filtros verticais e horizontais), podendo mesclar ambos.

Tabela 3.1- Constante dielétrica  $\epsilon_r$ , condutividade elétrica  $\sigma$ , velocidade de propagação do pulso de radar  $v$  e atenuação  $\alpha$  para diferentes materiais.

Material	$\epsilon_r$	$\sigma$ (MS/m)	$v$ (m/ns)	$\alpha$ (dB. m)
Ar	1	0	0,3	0
Água destilada	80	0,01	0,033	0,002
Água fresca	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3000	0,01	1000
Areia seca	3-5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
Sal seco	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Gelo	3-4	0,01	0,16	0,01
Metal	300	$10^{10}$	0,017	
Gasolina	1,94	$10^{-7}$	0,22	
Benzeno	2,8	$10^{-7}$	0,2	
Metanol	32,6	34	0,052	
DNAPL	2,3	$10^{-7}$	0,19	
Cascalho	2-6	0,01	0,1-0,2	
Argila seca	5	2	0,1	
Folhelho e siltito seco	5	1	0,1	
Calcário seco	4	0,5	0,15	
Silte saturado	10	1-10	0,09	
Solo arenoso seco	2,6	0,14	0,18	
Argila saturada	40	1000	0,04	
Solos argilosos seco	2,4	0,27	0,19	
Solo arenoso saturado	25	6,9	0,06	
Solo argiloso saturado	15	50	0,04	
Granito seco	5	0,01	0,1	
Arenito saturado	20-30	40	0,05-0,07	
Basalto seco	6	1	0,1	
Siltito saturado	30	100	0,05	
Diabásio seco	7	10	0,1	
Folhelho saturado	7	100	0,1	
Ferro	1	109	0,3	
Calcário saturado	8	2	0,1	
Aço	1	$\infty$	0,3	
Granito saturado	7	1	0,1	
PVC	8	0	0,1-0,17	
Basalto saturado	8	10	0,1	
Asfalto	3-5	0	0,1-0,12	
Diabásio saturado	8	100	0,1	
Concreto seco	5,5	0	0,13	
Concreto saturado	12,5	0	0,08	

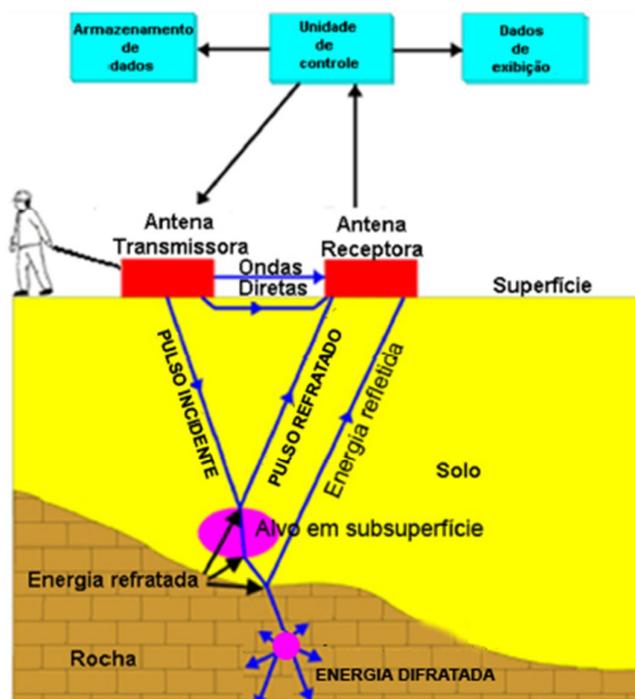
Fonte: Adaptado de Borges (2000) e Davis & Anan (1989).

Tabela 3.2 - Frequência central e respectiva profundidade estimada em diferentes áreas de aplicação.

Área de aplicação	Frequência central (MHz)	Profundidade de penetração (m)
Engenharia – Inspeção em concreto	1500	1
Engenharia – Identificação de vazios em concreto	900	2
Arqueologia, Engenharia e Meio Ambiente	400	4
Arqueologia, Geologia, Engenharia e Meio Ambiente	270	6
Arqueologia, Geologia, Engenharia e Meio Ambiente	200	7
Geologia, Engenharia e Mineração	100	20
Geologia	16-80	25-35

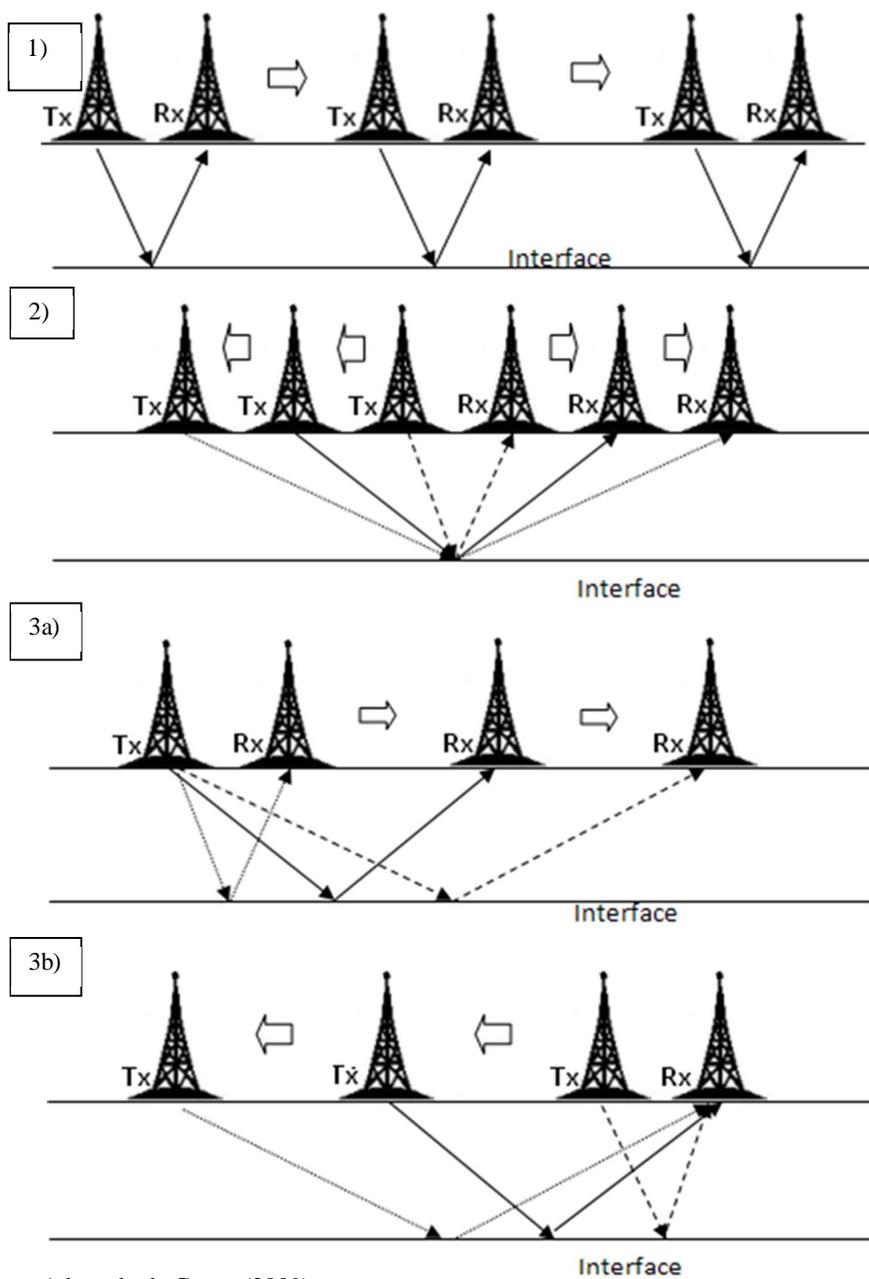
Fonte: (adaptada de GSSI, 2006)

Figura 3.1 - Esquema básico de funcionamento para GPR biestático blindado.



Fonte: Adaptado de Reynouds (1977).

Figura 3.2 - Técnicas de aquisição. 1) Afastamento constante. 2) Ponto médio comum. 3a) e 3b).



Fonte: Adaptado de Catete (2009).

É realizada, ainda, a conversão da escala de tempo para a de profundidade, o que demanda o conhecimento da velocidade da onda do local, a qual pode ser estimada através de ajuste a hipérboles presentes no radargrama.

Finalmente, é possível, ainda, realizar a operação de migração, para corrigir a geometria de camadas e objetos pontuais que muitas vezes podem acabar sendo representados por hipérboles e semi-hipérboles; filtros podem ser aplicados para concentrar o alvo e colapsar a hipérbole formada pelos dados e relacionado ao mesmo.

## 4 O SÍTIO NOSSA SENHORA DO PERPÉTUO SOCORRO

### 4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS

O sítio arqueológico Nossa Senhora do Perpétuo Socorro está localizado no Oeste do estado do Pará, próximo a fronteira com o Amazonas, no município de Itaituba, a margem do Rio Tapajós (Figura 4.1).

A equipe de trabalho partiu de Belém pelo aeroporto principal até a cidade de Santarém. O acesso ao centro de Itaituba, local onde se estabeleceu o centro de operações, se deu pela BR-163 e BR-230. Para se chegar ao sítio arqueológico Nossa Senhora do Perpétuo Socorro é necessário afastar-se do centro da cidade por estradas secundárias, continuando para nordeste por meio de estradas de terra batida, e, finalmente, por meio do rio Tapajós através de barco até uma pequena chácara homônima na entrada da boca Piracaná em direção a Popixuna 1, em um morro de topo plano.

Itaituba vem do Tupi e significa o "lugar dos pedregulhos", mas o solo mostra-se rico em argila. A topografia varia de 45 a 300 m e o clima é o típico amazônico.

O sítio Nossa Senhora do Perpétuo Socorro possui uma casa que serviu de moradia para várias famílias ao longo do tempo (Figura 4.2). A energia elétrica é fornecida por meio de gerador, a água é de poço, a alimentação é comprada na cidade e estocada e suplementada pela criação de diversos tipos de animais (porcos, gansos, patos, galinhas, etc.). Pela região de mata nas proximidades, assim como pelo relato dos moradores locais, a região era recoberta por vegetação densa de grande porte, que foram cortadas durante a ocupação. Próximo ao rio, o desnível do terreno é maior e as raízes, aflorantes (Figura 4.3). O terreno do sítio é bastante plano e parece aterrado, sugerindo que a área provavelmente possui densidade de raízes mortas robustas em profundidade.

### 4.2 AS URNAS

As urnas encontradas no sítio têm o formato parecido com o de uma semiesfera achatada; as maiores têm o diâmetro duas vezes maior do que a altura. Urnas menores tendem a ter morfologia mais diversificada. Alguns tamanhos de urnas aparecem na Tabela 4.1.

Figura 4.1 - Localização do sítio Nossa Senhora do Perpétuo Socorro. Topo: Município de Itaituba (vermelho) no estado do Pará. Centro: Sítio em relação ao centro da cidade de Itaituba. Base: Detalhe do sítio e proximidades.

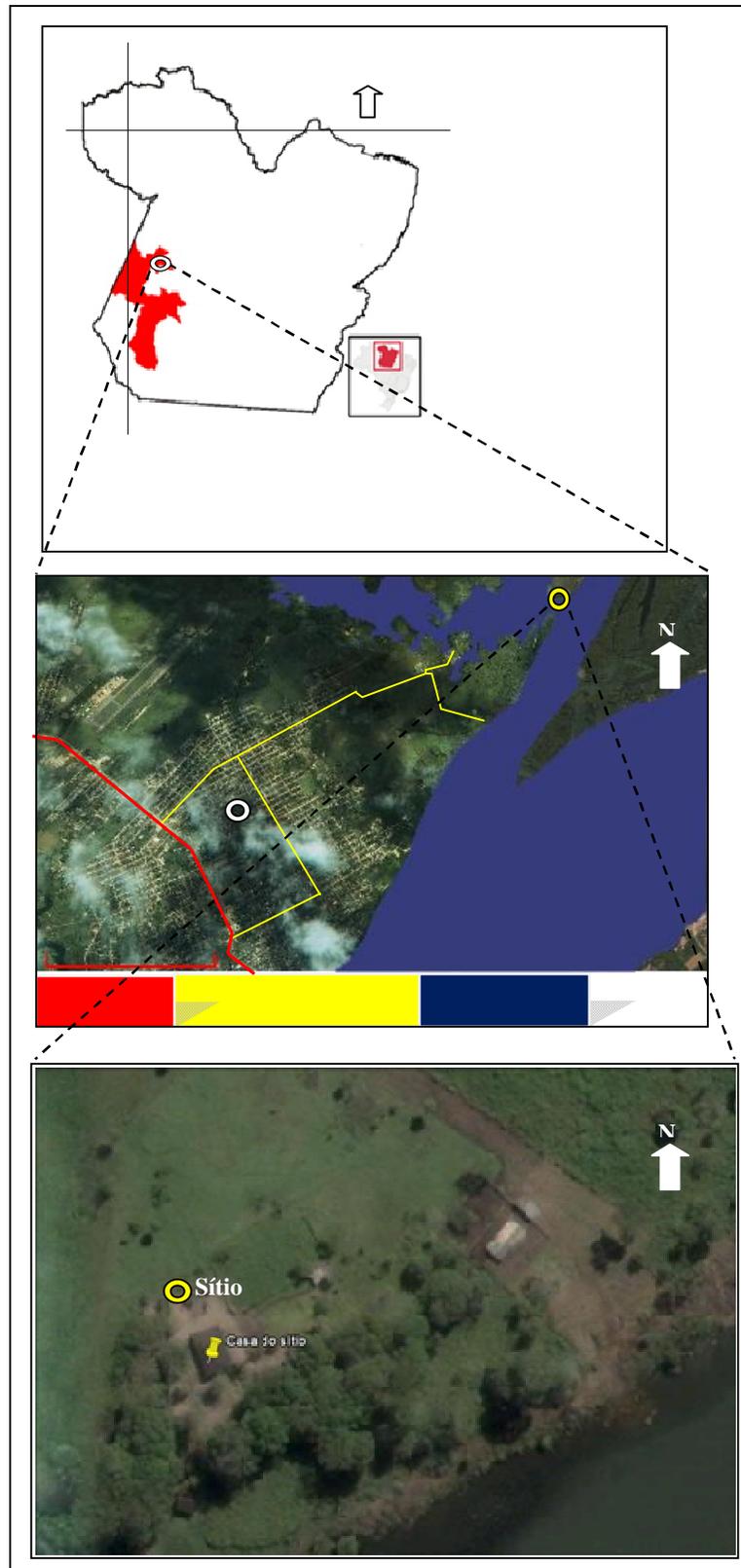


Figura 4.2 - Casa do sítio Nossa Senhora do Perpétuo Socorro.



Figura 4.3 - Raízes aflorando nas proximidades do Rio Tapajós.



As urnas maiores podem ser urnas mortuárias. Algumas estão cheias de sedimentos compactados devido ao colapso da tampa (Figura 4.4). As urnas menores não devem conter ossos, mas serem urnas cerimoniais.

Em campo, quando aflorantes, as urnas aparecem como objetos semi-esféricos de relevo levemente acentuado (Figura 4.5) ou cacos cerâmicos dispostos em posições semicirculares presos ao chão (borda) (Figura 4.6).

Tabela 4.1 - Proporções de algumas urnas.

<b>Altura (cm)</b>	<b>Diâmetro (cm)</b>
<b>Urnas maiores</b>	
<b>30</b>	<b>67</b>
<b>35</b>	<b>75</b>
<b>Urnas menores</b>	
<b>6,5</b>	<b>14</b>
<b>27</b>	<b>34</b>
<b>22,5</b>	<b>37</b>
<b>10</b>	<b>22,5</b>

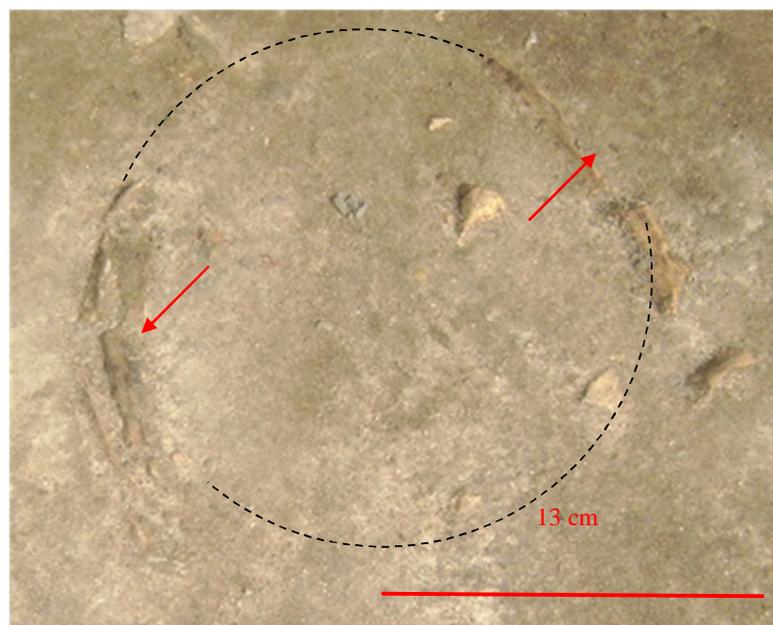
Figura 4.4 - Urna com diâmetro de aproximadamente 1 m, com sedimentos e restos de fragmentos.



Figura 4.5 - Aspecto de urna parcialmente escavada pela equipe do LAANF.



Figura 4.6 - Urna aflorante. Setas indicam suas bordas aparentes.



## 5 PREPARAÇÃO DAS ÁREAS DE MEDIDA E ESTRATÉGIAS DE MEDIÇÃO

A primeira etapa do trabalho geofísico englobou o reconhecimento preliminar da área e teste dos equipamentos. Foram selecionadas três áreas de interesse arqueológico, numeradas de 1 a 3 devido à ordem de seleção (Figura 5.1).

### 5.1 ÁREA 1

A área 1 está localizada à frente da casa e possui 40 x 10 m<sup>2</sup> (Figuras 5.1 e 5.2), sendo considerada potencialmente favorável a descobertas arqueológicas por apresentar urnas aflorantes nas proximidades da casa devido a ações antrópicas (Figuras 4.5 e 4.6). A área é plana, livre de gramíneas e de raízes aflorantes, o que simplifica a movimentação do GPR (Figura 5.3). Tanto o Método Magnético quanto o GPR foram utilizados nessa área.

Para agilizar o trabalho e facilitar futuros levantamentos e verificações da área, um sistema de coordenadas cartesianas para o local foi projetado, tomando-se a área 1 como ponto de partida e atribuindo-se ao seu vértice inferior direito as coordenadas  $x$ ,  $y$  como 0, 52 (Figura 5.2). Como referencial fixo foi utilizada a casa.

Para o levantamento magnetométrico, foi utilizado o magnetômetro de precessão de prótons M87C da Geotest (Figura 5.4), patrimônio do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará.

Antes de começar o levantamento magnético na área 1, selecionou-se um ponto fixo fora da área, onde não se apresentaram distúrbios magnéticos e as medidas magnéticas mostraram-se bastante estáveis, para levantamento da curva da variação magnética diária. As medidas nesta estação foram realizadas no início do trabalho, durante o trabalho a cada hora e ao final do trabalho.

As demais medidas magnéticas foram realizadas no intervalo de cerca de 9 às 11 horas e de 14 às 18 horas dos dias 21 e 22 de maio de 2010. O motivo de selecionar estes horários é evitar o máximo da variação diurna de um solar quiet day (Figura 2.2 topo), de modo a proceder a correção diurna tomando-se a variação das medidas como linear (item 2.6). A Figura 5.5 ilustra a variação diurna para o primeiro dia do trabalho. Pelos dados da EMBRACE (Estudo e Monitoramento BRAsileiro do Clima Espacial), o índice DST (índice geomagnético que mede o desenvolvimento temporal e intensidade de tempestades magnéticas) durante o perío-

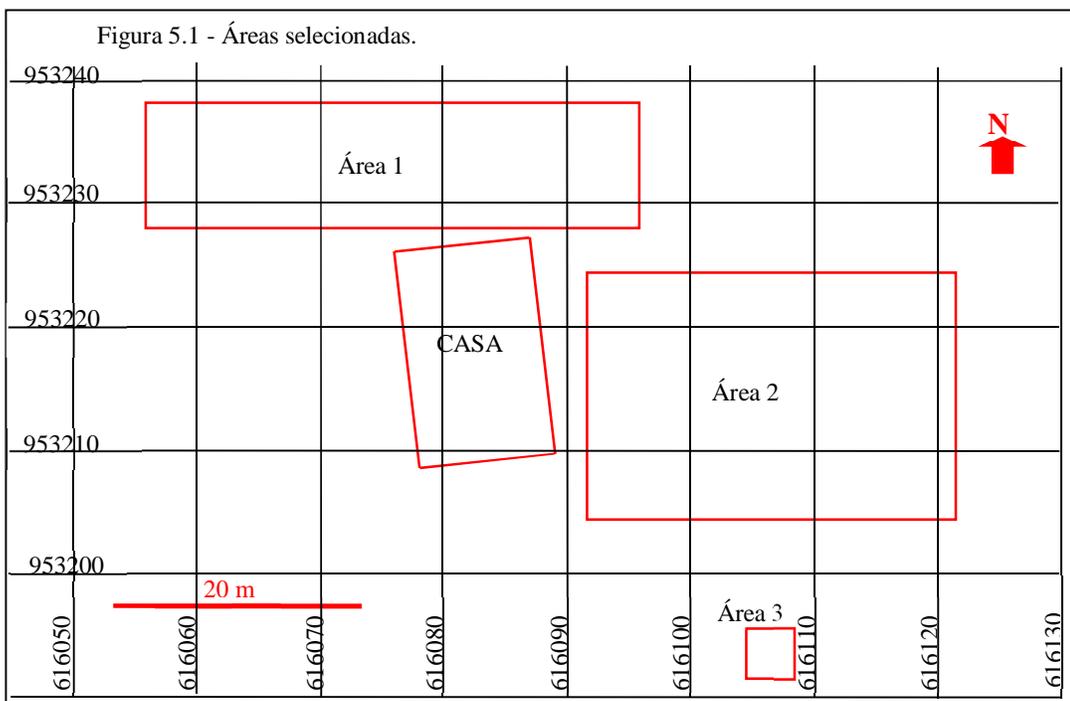


Figura 5.2 - Sistema cartesiano local, para agilizar medidas e verificações futuras na área. Coordenadas  $x, y$  do círculo vermelho: 0, 52.

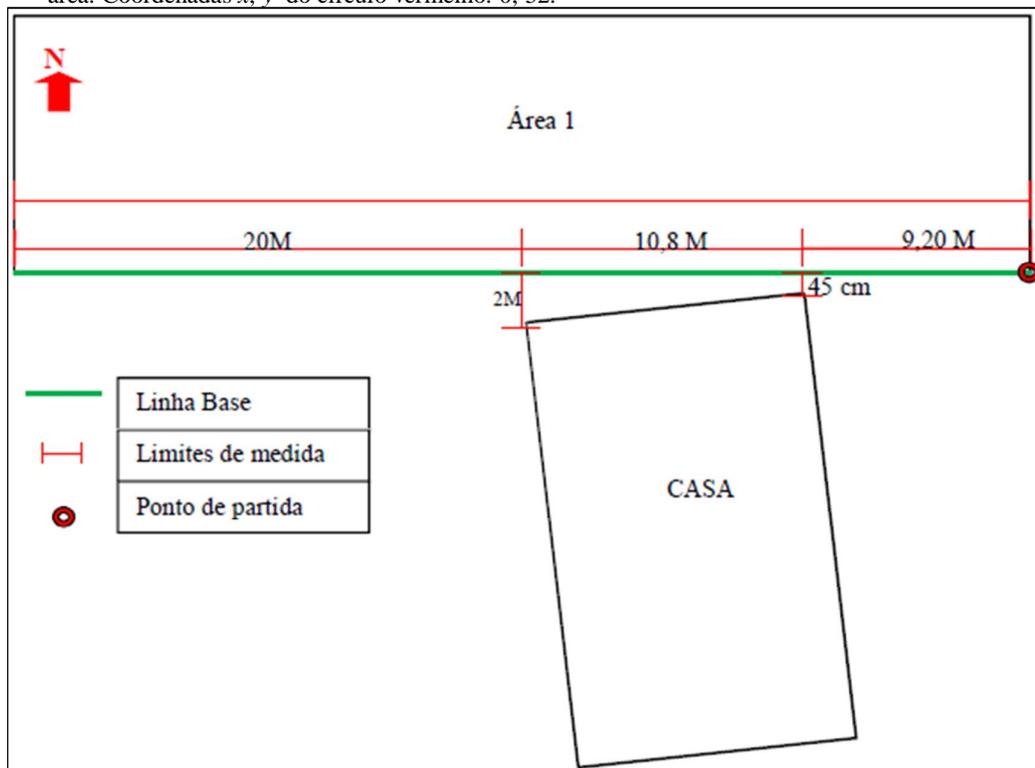


Figura 5.3 - Área 1.



Figura 5.4 - Magnetômetro modelo M87C da Geotest.



do de maio de 2010, revelou alterações fortes no campo magnético somente no início e final do mês de maio (Figura 5.6).

Figura 5.5 - Variação diurna para o 1º dia de trabalho (21/05/2010).  
Intervalo de trabalho em azul.

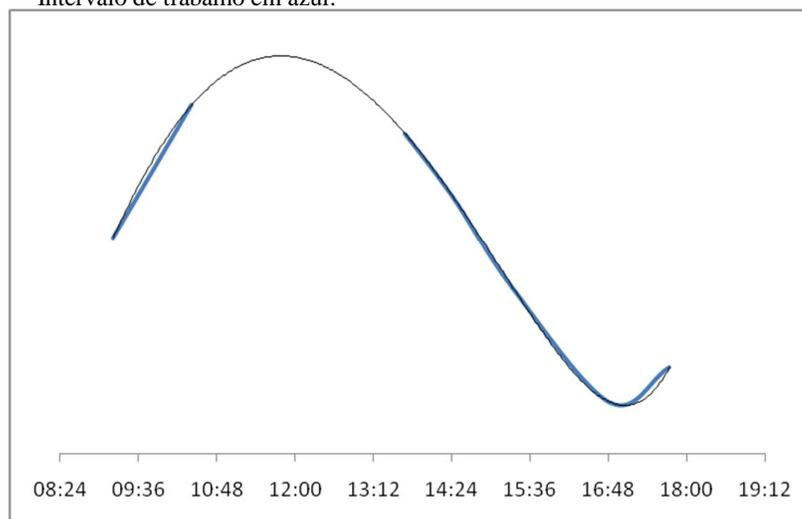


Figura 5.6 - Índice DST em tempo real de Kyoto, Japão, para o mês de maio (World Data Centre for Geomagnetismo - WDC-C2).



O levantamento magnetométrico da Área 1 foi realizado ao longo de perfis Leste -Oeste espaçados de 1 m em estações espaçadas também de 1 m (Figura 5.7).

Sendo conhecido o posicionamento de algumas urnas, tornou-se possível verificar a magnitude do sinal magnético das mesmas, resultante do seu contraste magnético com o

terreno, aproximando-se e afastando-se o sensor das urnas segundo diferentes alturas. O sinal magnético das urnas é muito pequeno, de modo que se optou por fazer o levantamento com o sensor do equipamento ao nível do chão, o mais próximos possível das possíveis ocorrências de outras urnas (Figura 5.8).

Todas as estações foram medidas três vezes com o magnetômetro para se obter uma média de leituras e o horário da medição anotado para posterior correção diurna.

No levantamento GPR, o equipamento utilizado foi o GSSI, modelo SIR-SYSTEM 3000, com uma antena monoestática de 400 MHz (Figura 5.9).

Foram feitas medidas ao longo de 21 perfis Leste-Oeste espaçados de 50 cm, cobrindo uma área de 480 m<sup>2</sup>, como é mostrado na Figura 5.10. A coincidência dos perfis GPR com as estações de medidas magnéticas é mostrada na Figura 5.11.

Figura 5.7– Distribuição espacial das medidas magnéticas.

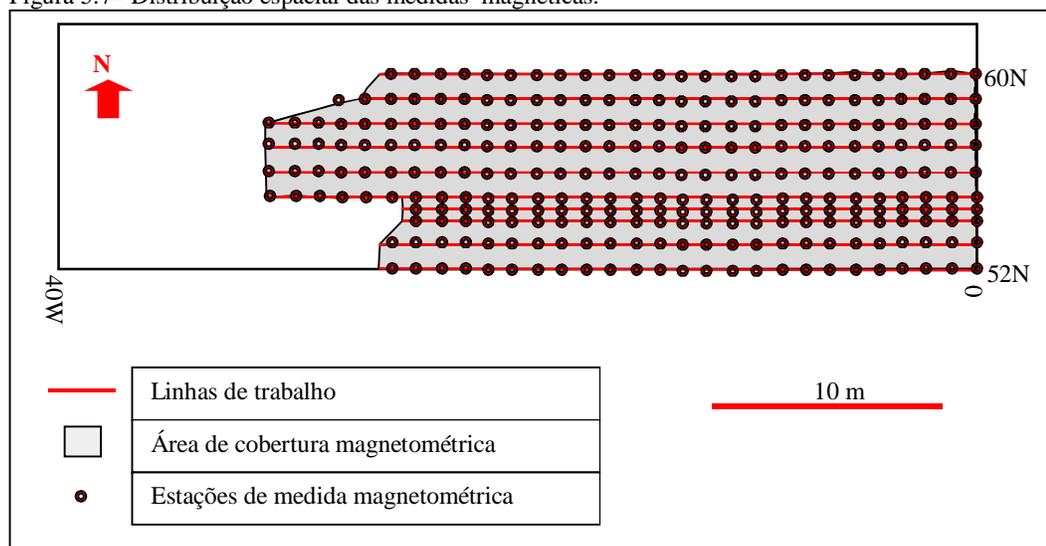


Figura 5.8– Sensor do magnetometro próximo ao chão.

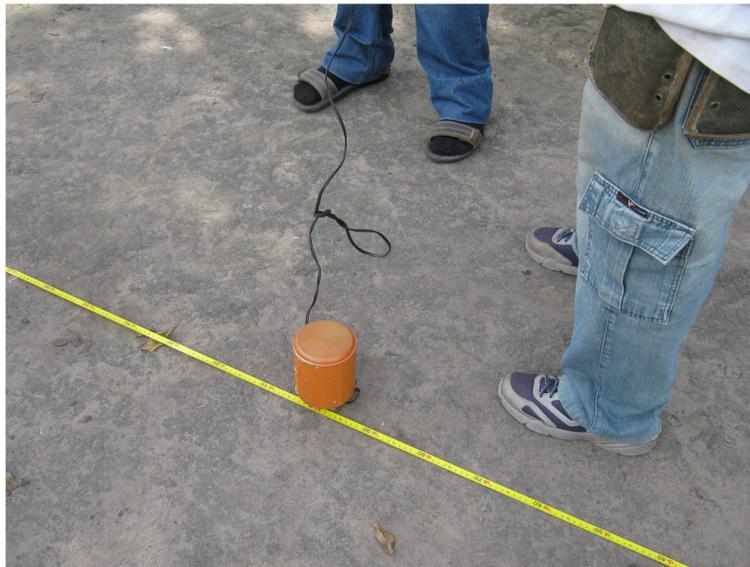


Figura 5.9 - Equipamento SIR-SYSTEM 3000. Antena de 400MHz.



Figura 5.10 - Distribuição espacial dos perfis de GPR na área 1.

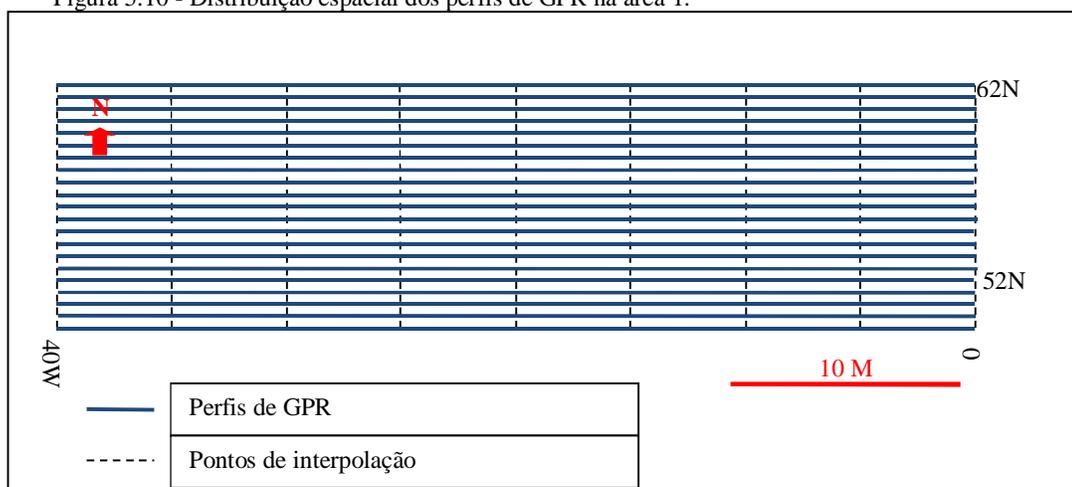
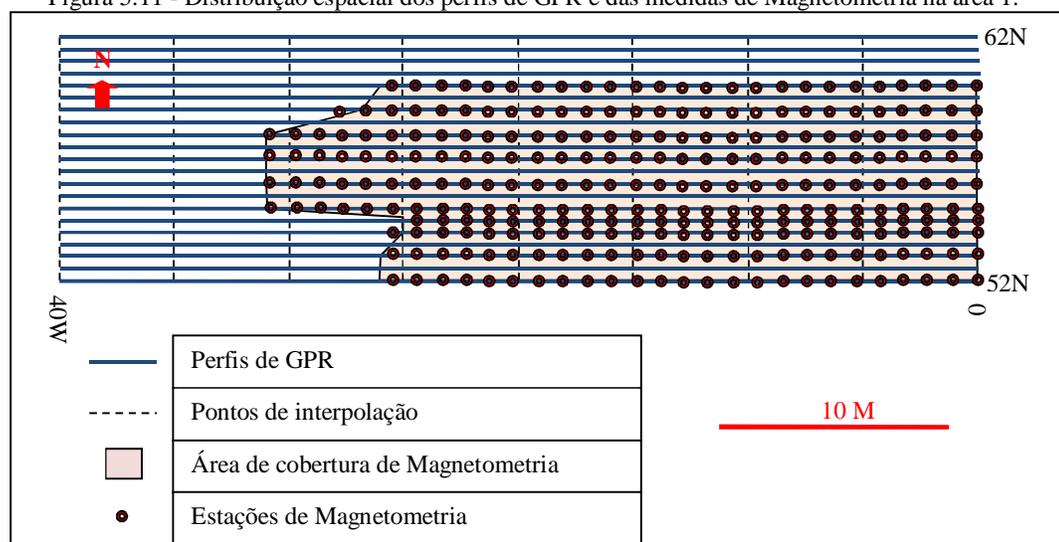


Figura 5.11 - Distribuição espacial dos perfis de GPR e das medidas de Magnetometria na área 1.



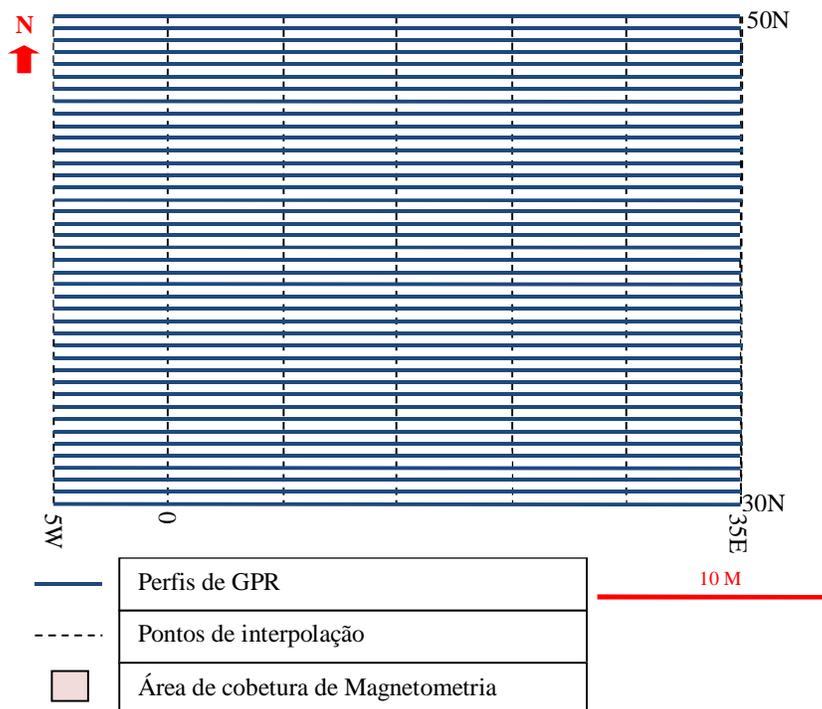
## 5.2 ÁREA 2

A área 2, localizada na lateral leste da casa, possui 30 x 20 m<sup>2</sup> (Figura 5.7). Ela não apresenta urnas aflorantes e nem sinal de revolvimento do solo pelos moradores. A área é plana, encoberto por gramíneas e apresenta árvores de médio porte esparsas com raízes robustas aflorantes que dificultam a passagem do GPR (Figura 5.12). O método utilizado nesta área foi o GPR utilizando-se o mesmo equipamento e parâmetros da área 1 (Figura 5.13). Somente o GPR foi utilizado na área 3 para podermos ajustar a quantidade de serviço ao tempo restante de mapeamento.

Figura 5.12 - Área 2.



Figura 5.13 - Distribuição espacial dos perfis de GPR na área 2.



### 5.3 ÁREA 3

A área 3, localizada a sudeste da casa, possui  $4 \times 4 \text{ m}^2$ . A área é plana, sem gramíneas mas é próxima a árvores de grande porte e, portanto, são esperadas interferências (ruídos) associados às suas raízes. Ela apresenta duas urnas aflorantes, a menor com diâmetro de 50 cm e a maior, com diâmetro de cerca de 75 cm (Figura 5.14). A área foi selecionada, por conter urnas aflorantes e possíveis urnas não aflorantes, como base para a investigação das assinaturas das urnas no Sítio Nossa Senhora do Perpétuo Socorro por meio tanto da Magnetometria (Figura 5.15) como do GPR (Figura 5.16).

O primeiro método a ser utilizado foi o GPR. Perfis Leste-Oeste foram marcados com auxílio de trena espaçados de 25 cm. O caminhamento do GPR foi feito da esquerda para direita com marcas para interpolação do início (0), centro (2) e final (4) do perfil (Figura 5.17).

Com o entorno da área piqueteada, barbantes foram passados a cada 0,5 m de uma ponta à outra da área, tendo as medidas de Magnetometria sido efetuadas sobre suas interseções (Figura 5.15). Nas proximidades das urnas foram tomadas medidas adicionais.

A Figura 5.18 mostra a distribuição das medidas GPR e magnéticas.

Figura 5.14 Urna aflorante. Seta vermelha indicando a borda.

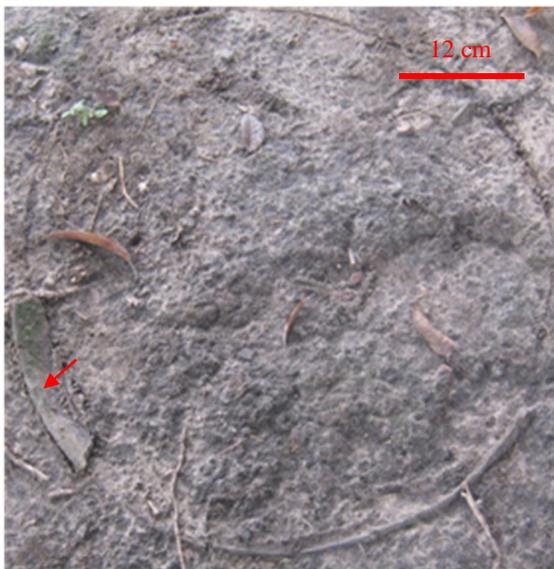


Figura 5.15 – Área 3 preparada para o levantamento magnético. Cada quadricula possui 50 x 50 cm<sup>2</sup>. Setas vermelhas: interseções onde foram feitas as medidas. Círculos azuis: urnas aflorantes.

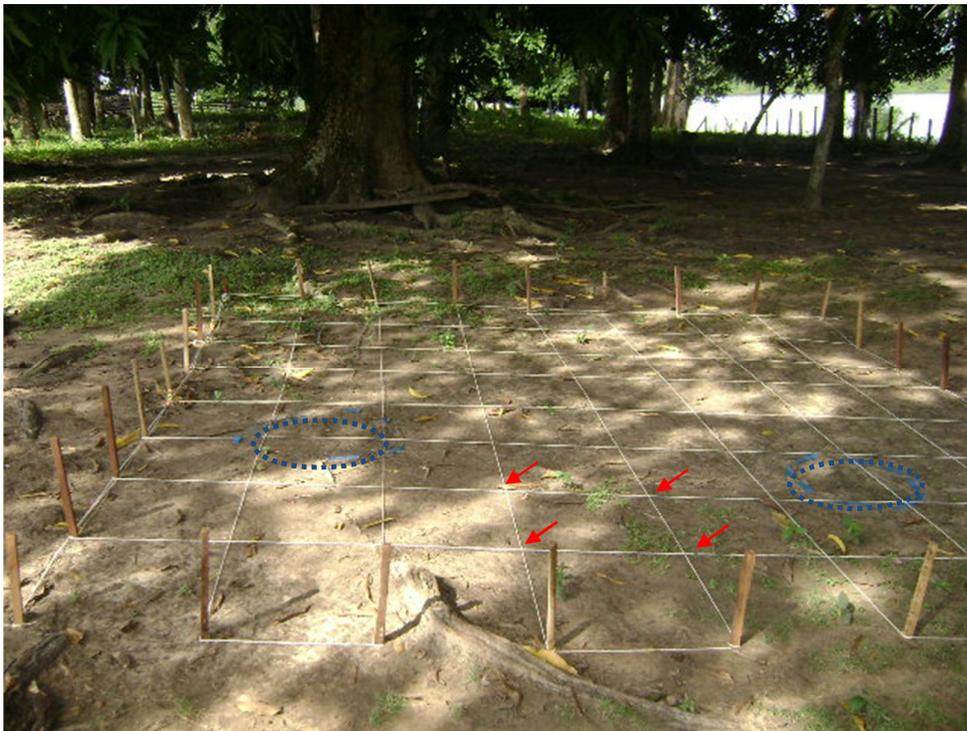
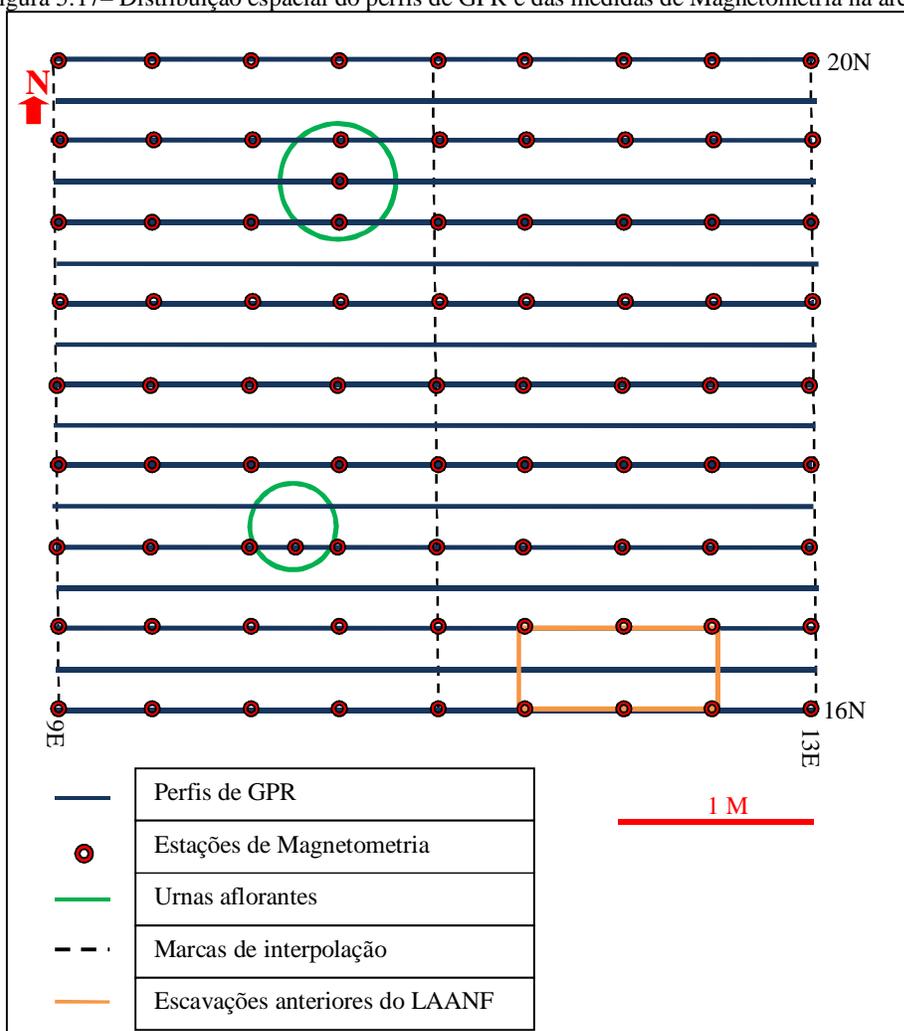


Figura 5.16 - Área 3 preparada para o levantamento GPR.



Figura 5.17– Distribuição espacial do perfis de GPR e das medidas de Magnetometria na área 3.



## 6 INVESTIGAÇÕES ADICIONAIS

### 6.1 ESTUDO DE VELOCIDADE

A transformação de tempos em profundidades nos radargramas exige o conhecimento da velocidade da onda eletromagnética em subsuperfície. É possível trabalhar com valores tabelados considerando as litologias presentes. Uma forma usual de obter a velocidade das ondas no meio é por meio do ajuste de hipérbolas de difração no radargrama, um fenômeno que ocorre quando o comprimento de onda do pulso incidente é maior ou da ordem de grandeza do raio do corpo difrator (corpo heterogêneo). Para trabalhos arqueológicos, entretanto, se faz necessário uma avaliação mais rigorosa, pois 10 cm de diferença na profundidade aumenta consideravelmente a possibilidade da não visualização do artefato arqueológico por ventura existente.

Para determinação da velocidade foi, conseqüentemente, enterrado um corpo de acentuado contraste nas propriedades eletromagnéticas com o meio, um pé de cabra, a uma profundidade conhecida, 30 cm, como mostra a Figura 6.1.

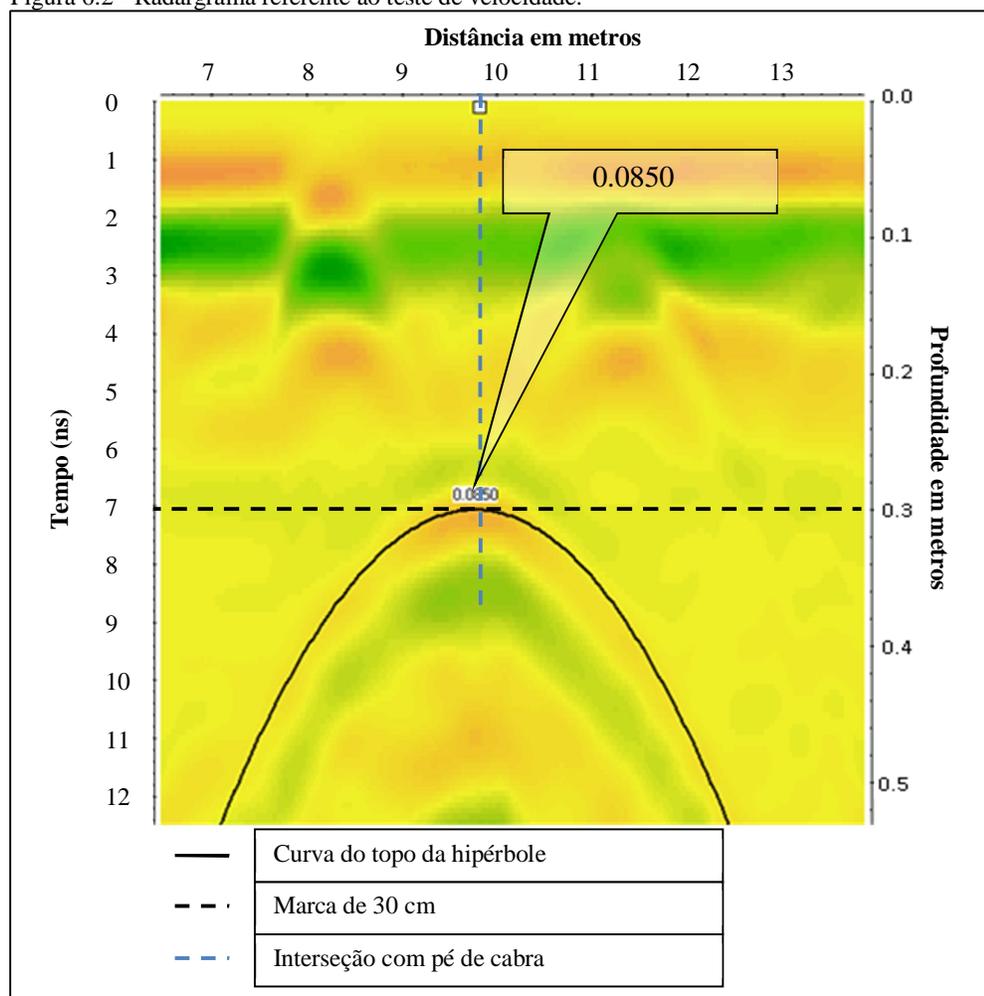
Figura 6.1- No centro, pé de cabra antes de ser coberto pelo solo. Linha pontilhada indica a posição de passagem do GPR.



Os dados obtidos foram processados com o programa Reflex 5.0 (SANDMEIER, 2006), fornecendo o radargrama mostrado na Figura 6.2. A presença do objeto enterrado provoca

difração. Sabendo-se a profundidade do topo do objeto, é possível testar, no processamento do radargrama, a velocidade que permita coincidir o topo da hipérbole provocada pelo corpo com a profundidade do mesmo e chegar, por esse meio, a uma velocidade ideal. Foi encontrada a velocidade de 0,085 m/ns, a ser utilizada no processamento de todos os dados GPR levantados no sítio arqueológico.

Figura 6.2 - Radargrama referente ao teste de velocidade.



## 6.2 ESTUDO SEDIMENTOLÓGICO

A escavação realizada para o estudo de velocidade, após as medidas, foi prolongada até 1 m de profundidade para observação do solo e caracterização de seus horizontes.

. Foram encontrados três horizontes, denominados de A, B e C (Figura 6.3).

O horizonte A é formado por sedimento areno-argiloso fino, mal selecionado, subarredondado, quase completamente composto por quartzo. Sua cor é escura é devida à presença de humus. Sua espessura é de cerca de 30 cm.

O horizonte B corresponde a um sedimento areno-argiloso moderadamente selecionado. É composto predominantemente por quartzo, mas contem minúsculas concreções de ferro. A cor é também escura, mas tende ao amarelado. Sua espessura é de cerca de 70 cm.

O horizonte C não é bem marcado como a passagem de A para B. Ele aparece próximo a 1 m e trata-se de sedimento argilo-arenoso de coloração amarela.

Figura 6.3 – Relações de profundidade entre os horizontes A, B e C.

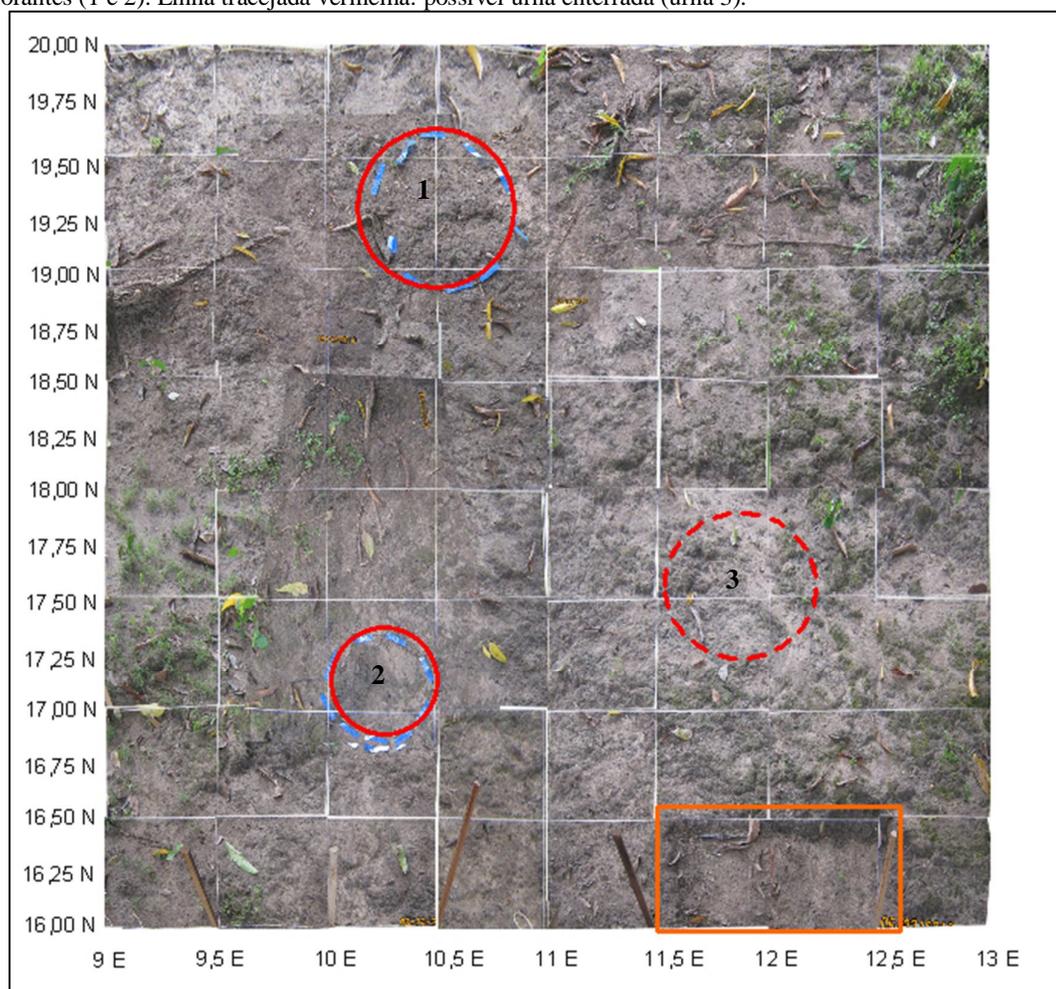


## 7 PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO

### 7.1 ÁREA 3

A área 3, área base para a investigação das assinaturas das urnas a serem utilizadas na interpretação das áreas 1 e 2, foi a primeira a ser investigada. Na área tem-se o conhecimento da posição e tamanho de duas urnas aflorantes, além da presença de raízes observáveis em superfície (Figuras 5.17 e 7.1).

Figura 7.1-Vista superior da área 1. Retângulo laranja: escavações anteriores Linha cheia vermelha: urnas aflorantes (1 e 2). Linha tracejada vermelha: possível urna enterrada (urna 3).



### 7.1.1 GPR

Os dados de GPR da área 1 bem como das demais áreas foram igualmente processados com o programa Reflex versão 5.0 (SANDMEIER, 2006), para não haver tendenciosidade. Primeiramente foi feita a correção do tempo zero, a interpolação de marcas e ajustado o comprimento total da linha levantada, após adicionou-se um ganho de CGC de aproximadamente 1 com o objetivo de facilitar a visualização dos contrastes. Vários filtros (bandpass, deconvolution, dewow, migração, FK, Remoção de ondas diretas) foram usados sem que se obtivesse melhoria significativa da apresentação dos dados, optando-se por manter o processamento de campo.

Foram estudados um total de 17 radargramas, cuja denominação foi dada pela sua posição em relação às coordenadas cartesianas locais padronizadas; seriam eles radargramas 16N a 20N (Figura 5.17). Com base na posição das urnas sabe-se que os seguintes perfis passam por sobre as urnas: 17N e 17,5N sobre a urna 2 e 19N, 19,25N e 19,50N sobre a urna 1

Cada radargrama foi avaliado primeiramente de forma individual com o objetivo de identificar feições marcantes (avaliação 2D) e depois em conjunto para caracterizar feições com continuidade lateral (avaliação 3D).

Na avaliação 2D foram identificados 3 tipos de feições.

As feições do primeiro tipo são hipérbolas grandes e bem formadas, relacionadas a raízes de grande porte que atravessam o perfil, como a hipérbole mostrada na Figura 7.2.

O segundo tipo de feições presentes são hipérbolas pequenas, mal formadas e de difícil visualização, como mostrado na Figura 7.3, associadas a raízes pequenas ou secundárias.

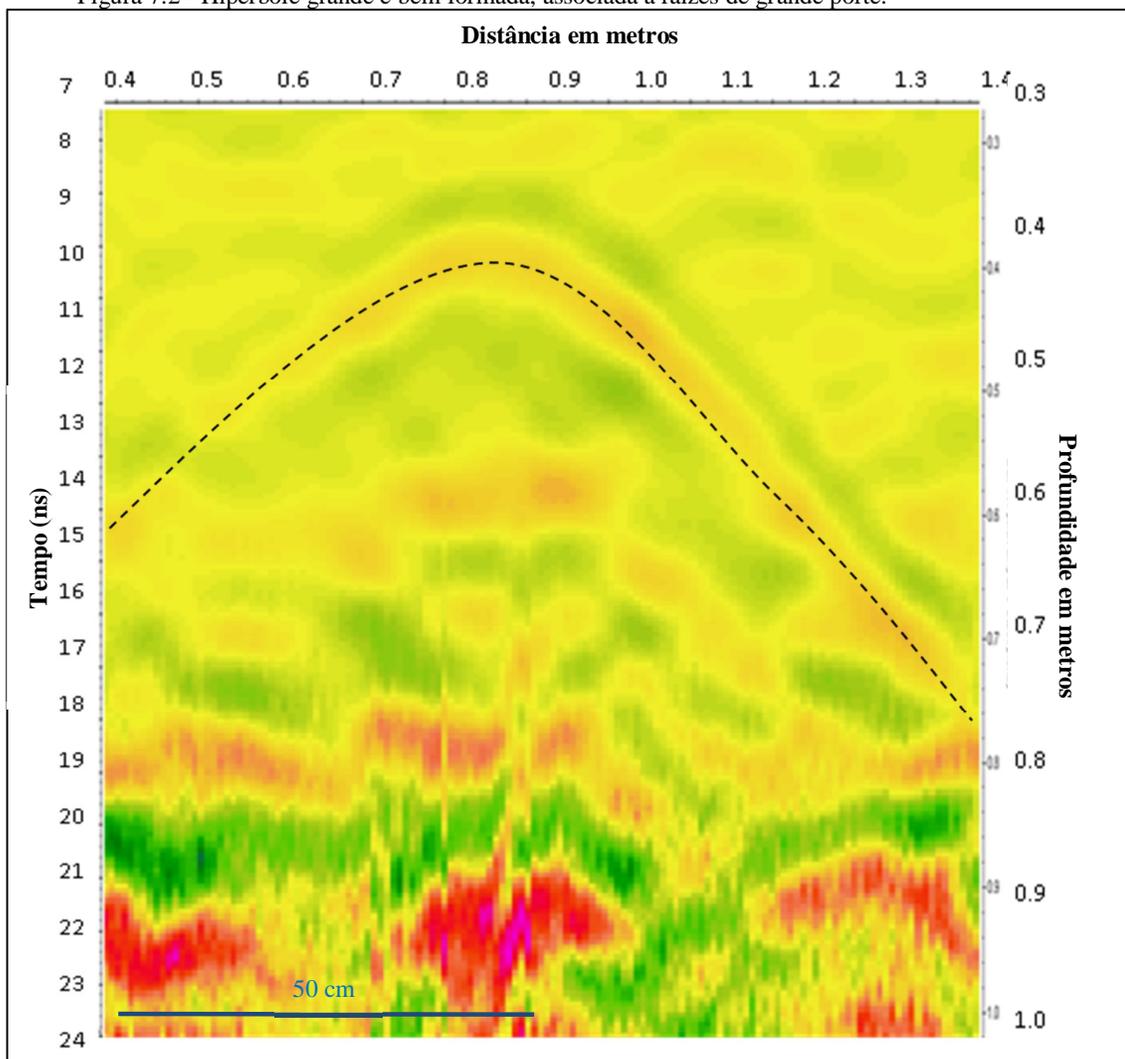
Finalmente, foram também observadas feições de maior contraste, levemente horizontalizadas, sobre a base da urna, com hipérbolas similares às feições do segundo tipo acima descrito onde seriam as bordas das urnas, formando uma imagem geral que dá a noção de hipérbolas invertidas como pode ser observado nos radargramas obtidos sobre a urna 2 mostrados nas Figuras 7.4 e 7.5.

A urna 1 produz feições no radargrama similares à urna 2 (Figura 7.6).

A assinatura das urnas como uma hipérbole invertida pode ser reflexo da estrutura da urna se verticalizar nas bordas, dando origem às hipérbolas nas bordas da hipérbole maior

invertida como mostrado no desenho esquemático da Figura 7.7. Quanto menor a urna, menor seria a probabilidade de formar tão feição. Outro guia é dado pela informação de que as urnas que já foram retiradas mostram altura igual à cerca de metade do diâmetro (Tabela 4.1).

Figura 7.2 - Hipérbole grande e bem formada, associada a raízes de grande porte.



Cada perfil GPR varre a urna como uma fatia de uma semiesfera diferente (Figura 7.8). Então, à medida o perfil está mais distante do centro da urna, mais a feição no radargrama se assemelhará a de urna menor e mais rasa. Os radargramas obtidos sobre os perfis 17 N e 17,25 passam, respectivamente, no centro e borda da urna 2 (Figura 7.9).

O radargrama 17,25N (Figura 7.9) mostra uma feição assinalada por uma seta verde, que, por analogia com as assinaturas da urna 2, sugere a presença de uma terceira urna não

aflorente. Esta urna, vista em detalhe na Figura 7.10, teria proporções de 1 m de diâmetro, seu topo estaria a 16 cm de profundidade e sua base estaria a cerca de 36 cm de profundidade (Figura 7.10).

Tendo conhecimento das feições possíveis na análise 2D, os perfis receberam ganho em escala total de 0,2.

Figura 7.3 - Hipérbole pequena e mal formada associada a raízes de pequeno porte.

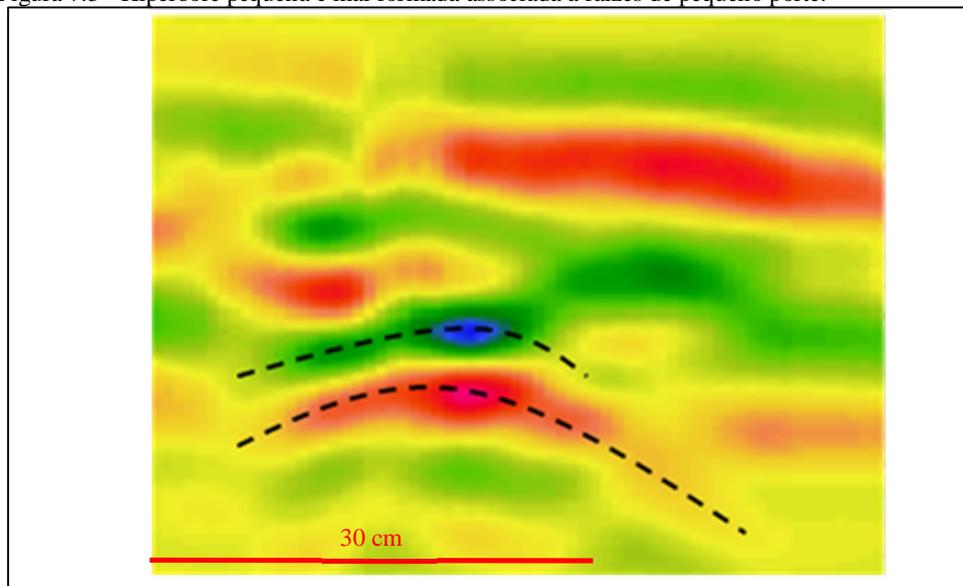


Figura 7.4 - Estrutura de contraste elevado no radargrama obtido no perfil 17N que passa pelo centro da urna 2. Setas pretas: bordas da urna. Setas azuis: fundo da urna com aspecto de hipérbole invertida.

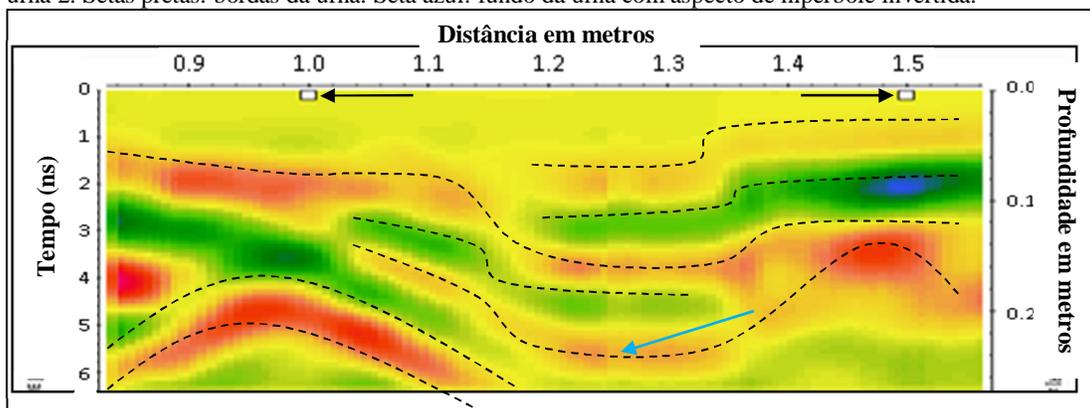


Figura 7.5 - Estrutura de contraste elevado no radargrama 17,25N que passa pela urna 2. Setas pretas: bordas da urna. Seta azul: fundo da urna com aspecto de hipérbole invertida.

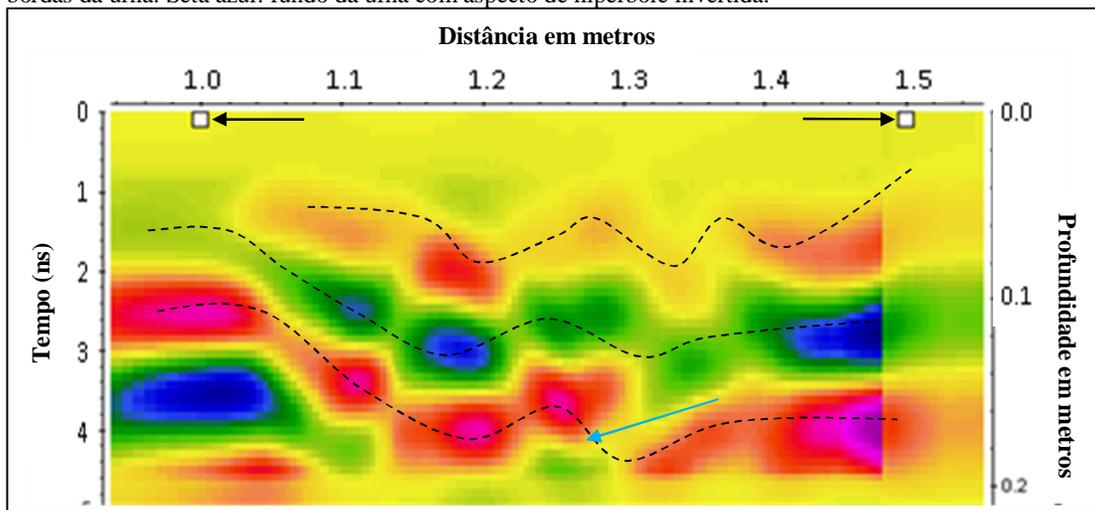


Figura 7.6 - Estrutura de contraste elevado no radargrama 19N que passa pela urna 1. Setas pretas: bordas da urna. Seta azul: fundo da urna com aspecto de hipérbole invertida.

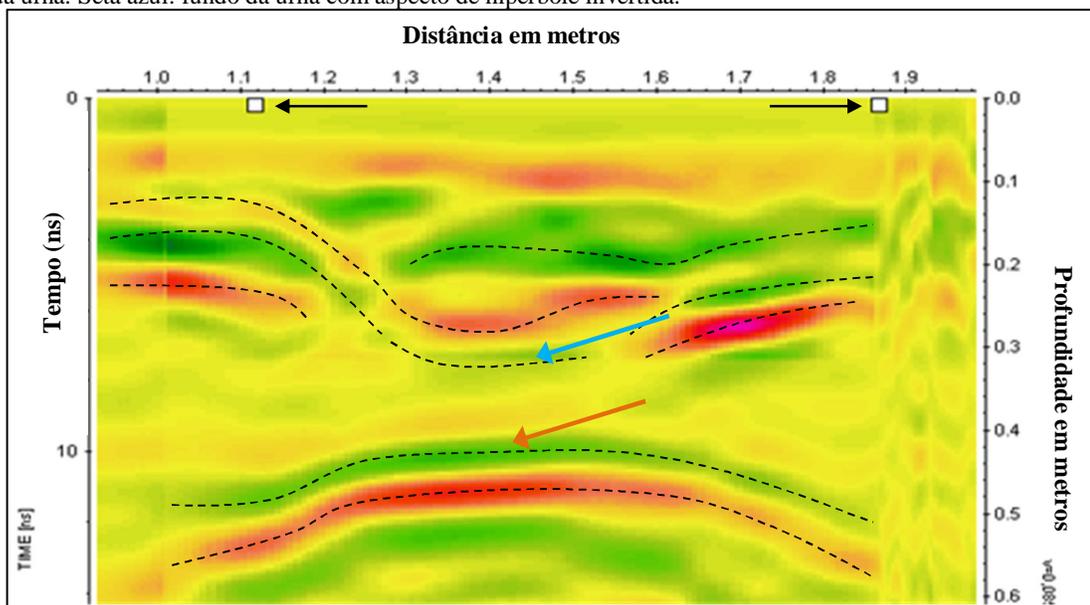


Figura 7.7 - Possível assinatura GPR para as urnas. Curvas em verde e vermelho tentando imitar variações de cores no radargrama.

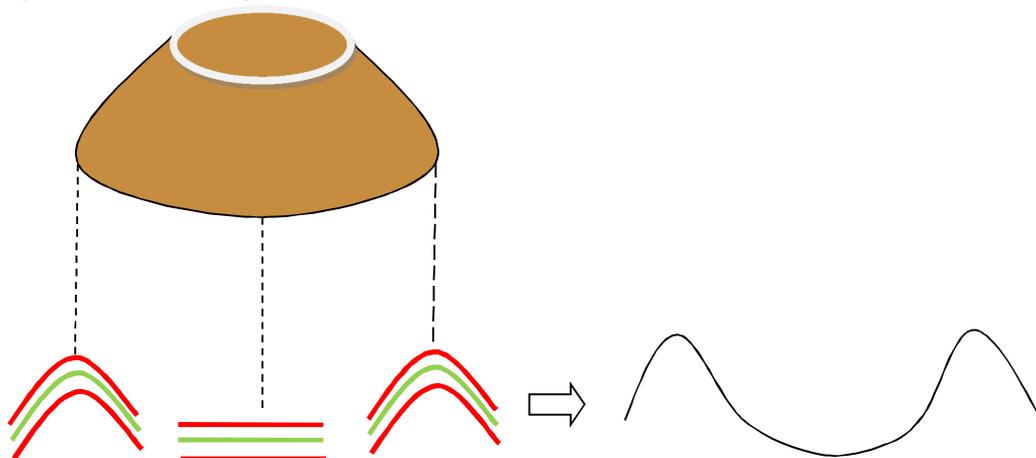


Figura 7.8- Urna vista de topo à esquerda e como vista pelo GPR de perfil ao longo de três linhas.

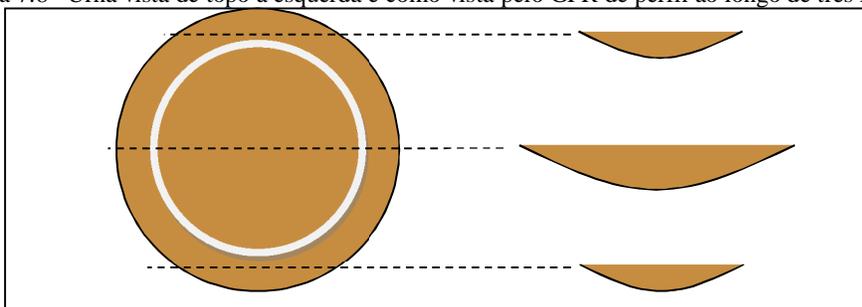


Figura 7.9 - Radargramas 17,25 e 17 N. Seta azul: l hipérboles de raiz de árvore. Caixa vermelha: urna 2. Seta verde: provável urna não aflorante.

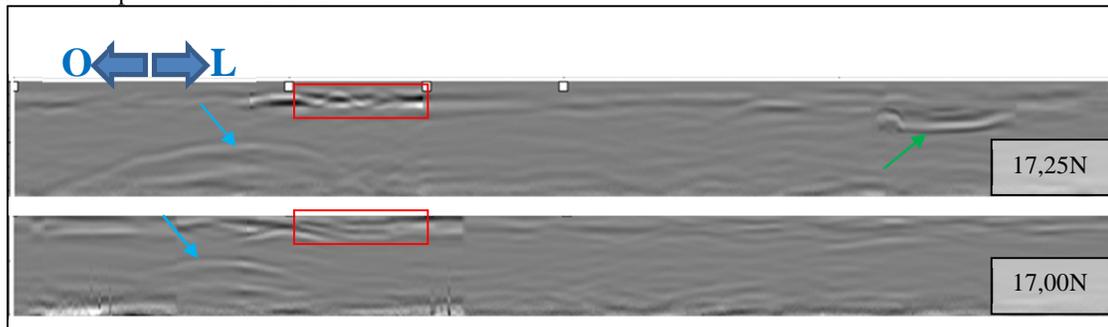
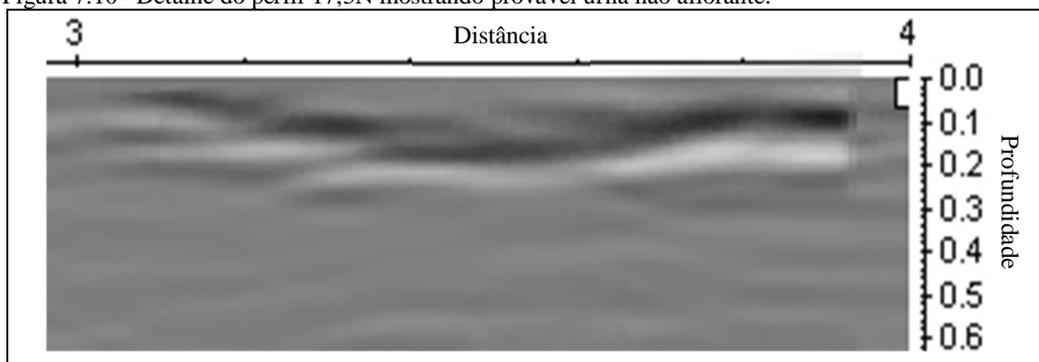


Figura 7.10– Detalhe do perfil 17,5N mostrando provável urna não aflorante.



A assinatura das urnas aparece somente a partir de 10 cm de profundidade nos radargramas já com a correção estática. Ocorre, portanto, uma zona cega, uma zona de sombra até aproximadamente a profundidade de 10 cm como pode ser observado em detalhe na Figura 7.11. É possível que as ondas diretas ainda tenham efeito sobre o topo do perfil mesmo após a remoção da correção estática.

Foram realizados teste sobre marreta enterrada a 10 e a 30 cm de profundidade. Nos radargramas obtidos, não foi observado efeito da marreta a 10 cm de profundidade em terreno arenoso, enquanto que a marreta enterrada a 30 cm de profundidade.

A zona de sombra não afeta todo o possível sinal das urnas aflorantes pois elas possuem altura estimada entre 20 e 30 cm. Objetos, mais rasos, não seriam observados.

Só a avaliação 2D dos dados, ou seja, pelos radargramas, não basta para montar um esquema de identificação. É preciso observar ainda as continuidades laterais. Os dados contidos nos radargramas foram usados para compor, por meio de sua interpolação, bloco diagrama 3D. Esses dados foram tratados com o filtro *contrast stretching*, que aumenta o contraste entre as feições. Seções horizontais são expostas nas Figuras 7.12 a 7.20 com a finalidade de mostrar a gradação e a mudança das feições existentes nos radargramas. As urnas aparecem marcadas com um círculo.

As seções superficial e a 3 cm de profundidade (Figura 7.12) não permitem distinguir as urnas aflorantes 1 e 2, devido à zona de sombra.

As seções da área a 6 e a 9 cm de profundidade (Figura 7.13) mostram figuras irregulares de contraste acima do normal indicadas por setas pretas, que poderiam ser interpretadas como possíveis urnas, porém nem todas essas anomalias têm continuidade

horizontal (e, vertical, observando-se as seções seguintes obtidas a maiores profundidades), sendo possivelmente ruído de menor relevância.

As seções da área 3 a 12 e a 16 cm de profundidade (Figura 7.14) mostram anomalias mais concentradas na área em que realmente ocorrem as duas urnas.. Na seção obtida para 16 de profundidade é possível observar uma anomalia semelhante àquelas obtidas sobre as urnas aflorantes, que sugere a presença de uma terceira urna.

Figura 7.11 - Linha pontilhada mostrando o final da zona de sombra do Georadar em trecho do perfil 17,25N. Seta preta: borda da urna 2.

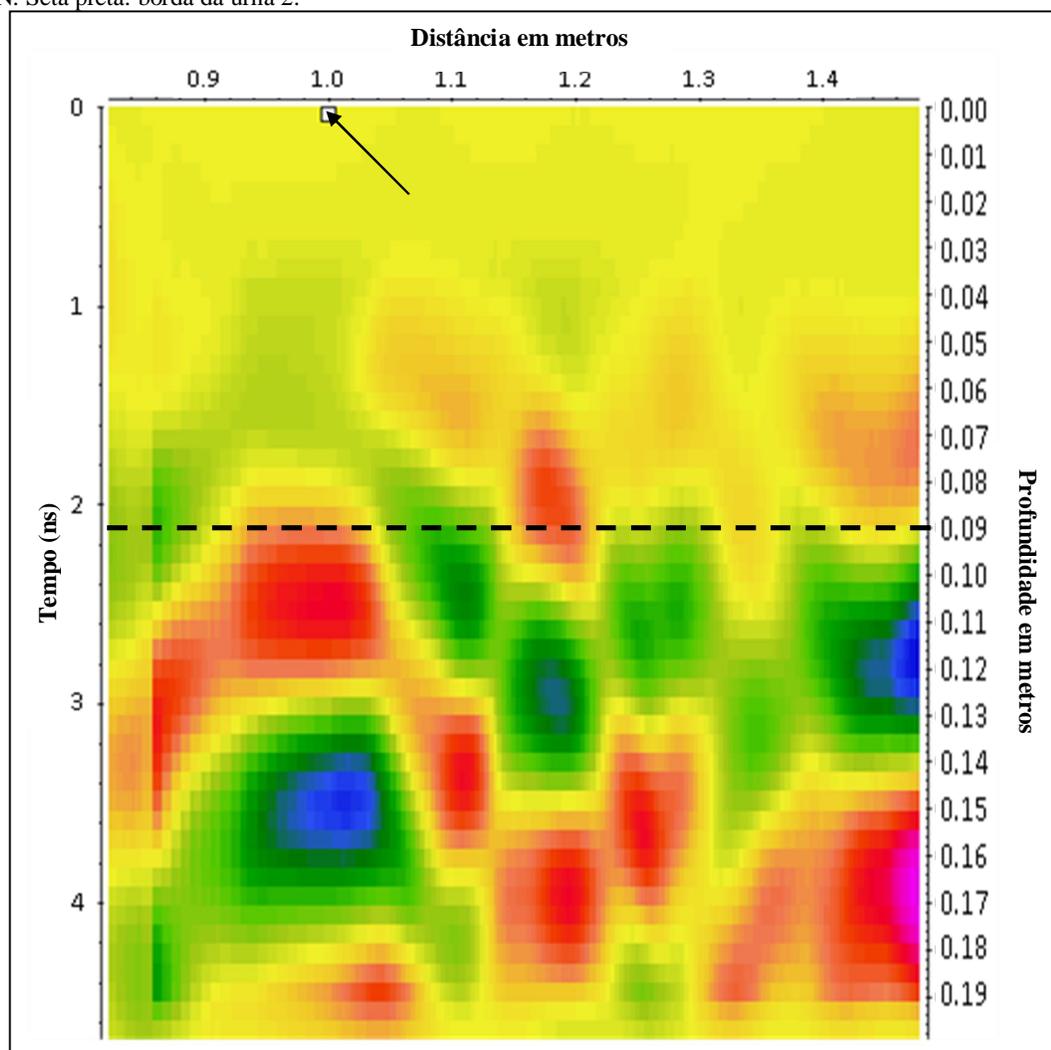


Figura 7.12 - Seções GPR superficial (esquerda) e a 3 cm de profundidade (direita). Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2.

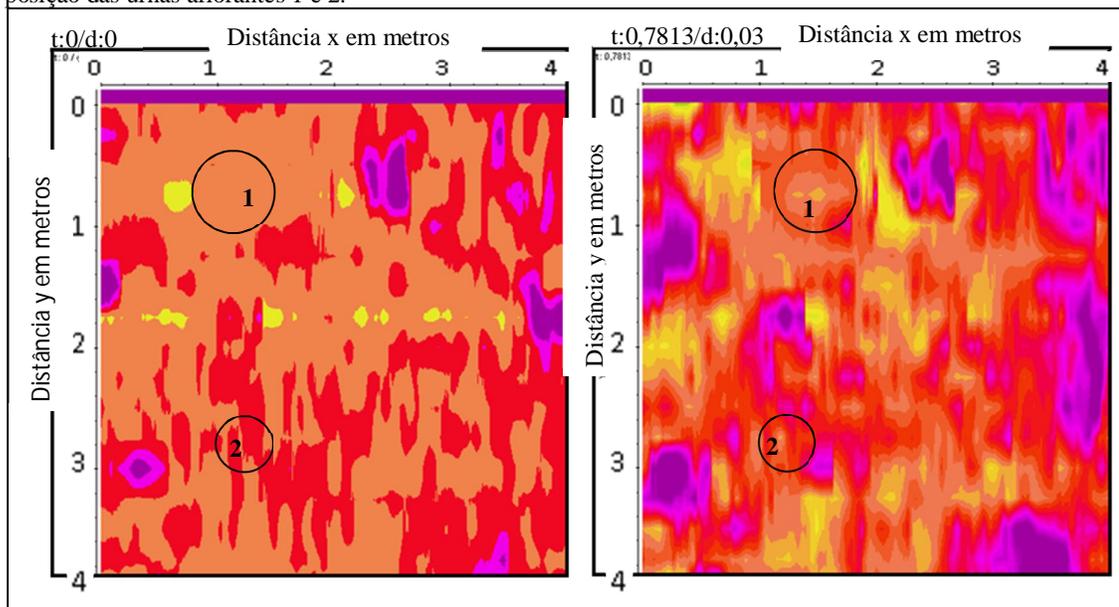
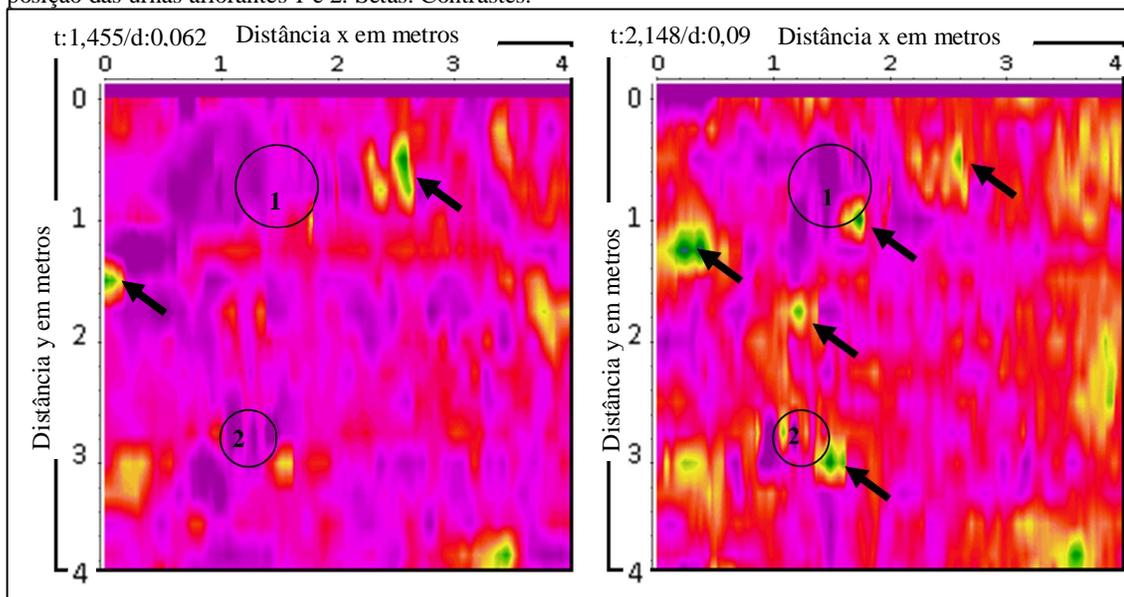


Figura 7.13 – Seções GPR a 6 e a 9 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente). Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Setas: Contrastes.



As seções a 19 e a 22 cm de profundidade (Figura 7.15) mostram a continuidade das 3 urnas em profundidade. O sinal da urna 2, contudo, vai se tornando tênue, efeito previamente esperado por ser ela urna de menor diâmetro e, por isso mesmo, a de menor altura.

As seções a 19 e a 22 cm de profundidade (Figura 7.16) mostram, a primeira um último resquício do sinal da urna 2 e a ausência do mesmo, o que indica que essa urna tem sua base a uma profundidade de aproximadamente 25 cm. A urna 1 e a aprovável urna 3 continuam aparecendo.

As seções a 31 e a 34 cm de profundidade (Figura 7.17) aparecem os últimos vestígios do sinal que está sendo considerado provocado pela urna 1. Essa urna possui diâmetro igual a 75 cm de diâmetro e profundidade de cerca da metade desse seu diâmetro, segundo o padrão observado para as urnas já desenterradas, como citado anteriormente. Logo, pode-se supor que a base da urna deve ser encontrada logo após 35 cm de profundidade. É possível ainda notar na seção contida para 34 cm de profundidade, uma nova anomalia, que poderia indicar uma nova urna. Essa anomalia, porém, mostra um contraste maior com o meio e é mais focalizada. A comparação dos radargramas (2D) permite localizar espacialmente essa anomalia (Figura 7.21) e revela que ela foi gerada pela presença de raiz de grande porte que corta todos os perfis na direção norte-sul.

Nas seções a 37 e 40 cm de profundidade (Figura 7.18) pode-se notar os sinais finais da urna 3. Pela assinatura da urna 3 nos perfis, é possível estimar que ela tenha 24 cm de altura, o que a torna mais baixa do que o esperado, pelos primeiros sinais, pode-se inferir que ela tenha um diâmetro de 70 cm, e, portanto, seria de esperar altura de 30 a 35 cm. A seção obtida para 40 cm de profundidade mostra uma sequência de anomalias similares que pode ser interpretada como a assinatura de raiz de grande porte em subsuperfície.

Nas seções obtidas para 43 e 46 cm de profundidade (Figura 7.19) bem como na seção para 48 cm (Figura 7.20) observa-se apenas a presença de sinais provocados pela raiz.

Figura 7.14 – Seções GPR a 12 e a 16 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente).  
Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna.

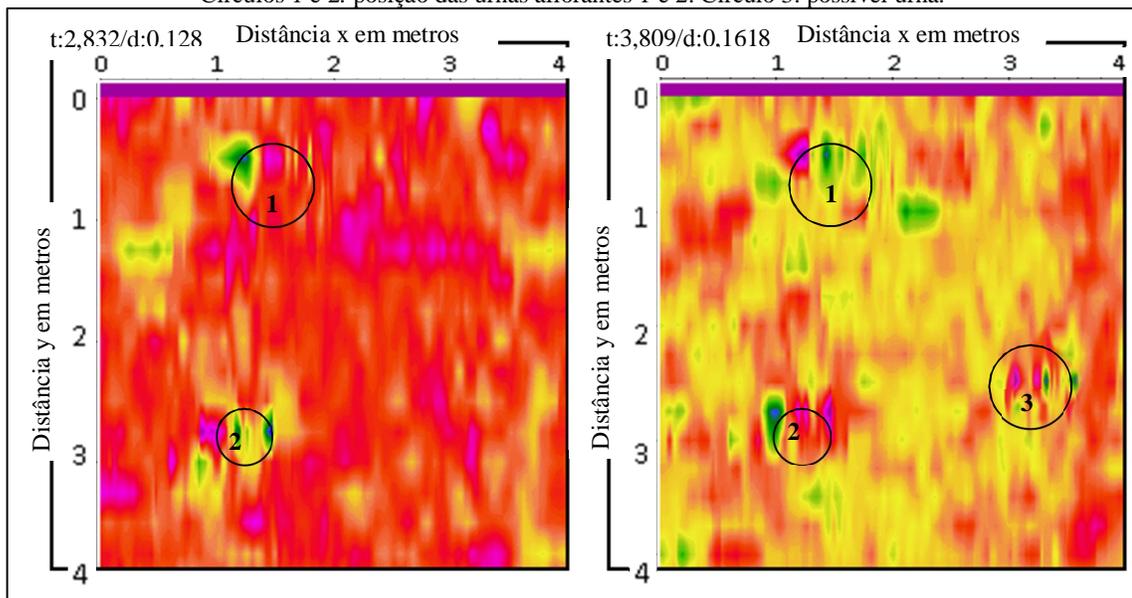


Figura 7.15 – Seções GPR a 19 e a 22 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente). Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna.

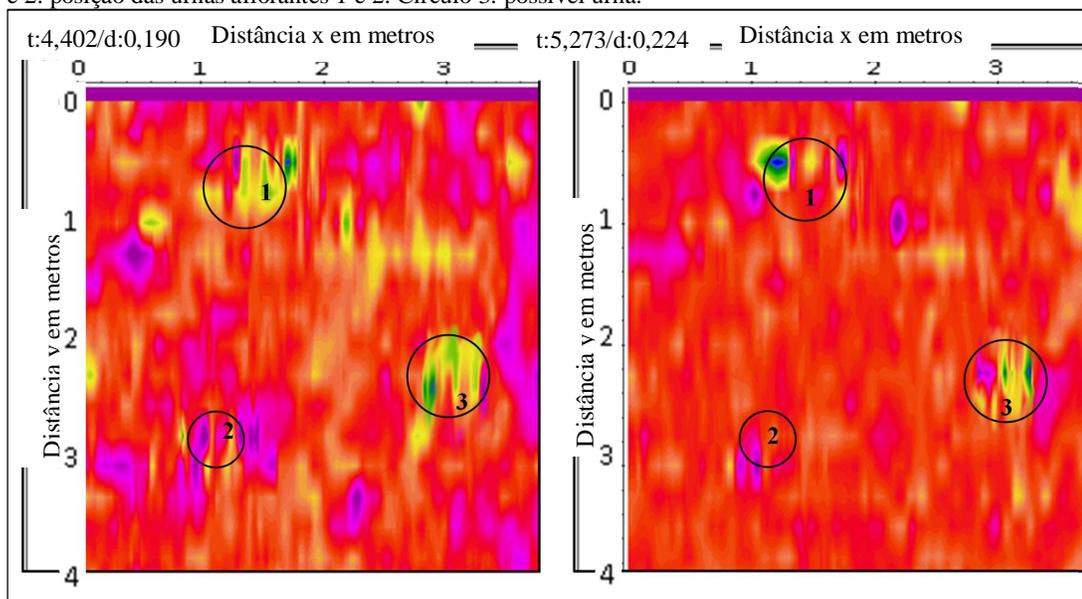


Figura 7.16 – Seções GPR a 25 e a 28 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente).  
Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna.

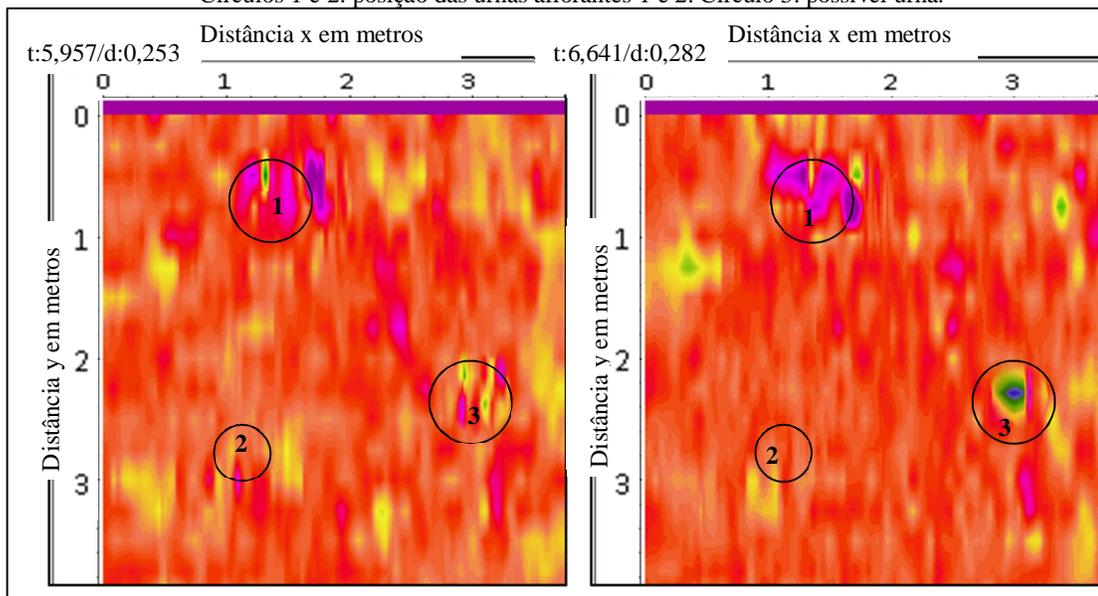


Figura 7.17– Seções GPR a 31 e a 34 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente). Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna.

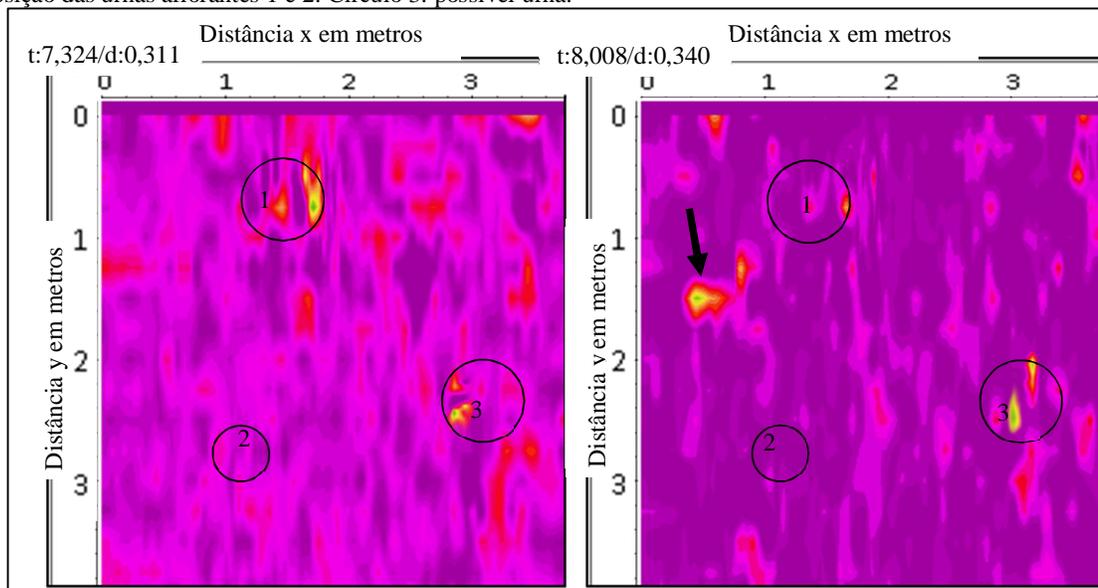


Figura 7.18– Seções GPR a 37 e a 40 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente). Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna. . Linha marrom, na seção a 40 cm de profundidade: sinais da raiz de grande porte.

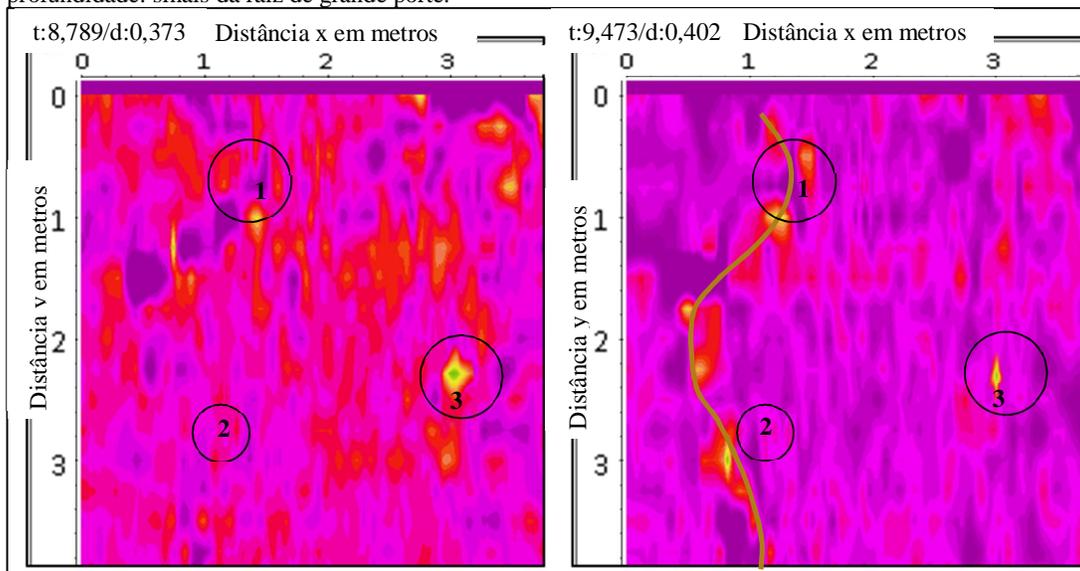


Figura 7.19– Seções GPR a 43 e a 46 cm de profundidade (esquerda e direita, respectivamente). Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna. Linha marrom: sinais da raiz de grande porte.

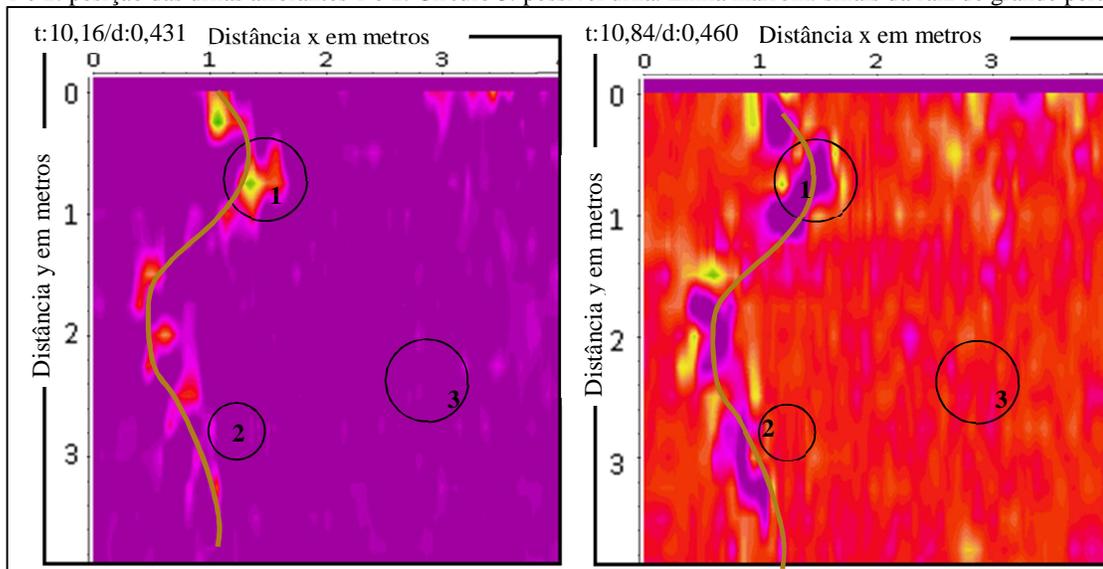


Figura 7.20– Seção GPR a 48 cm de profundidade. Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna. Linha marrom: sinais da raiz de grande porte.

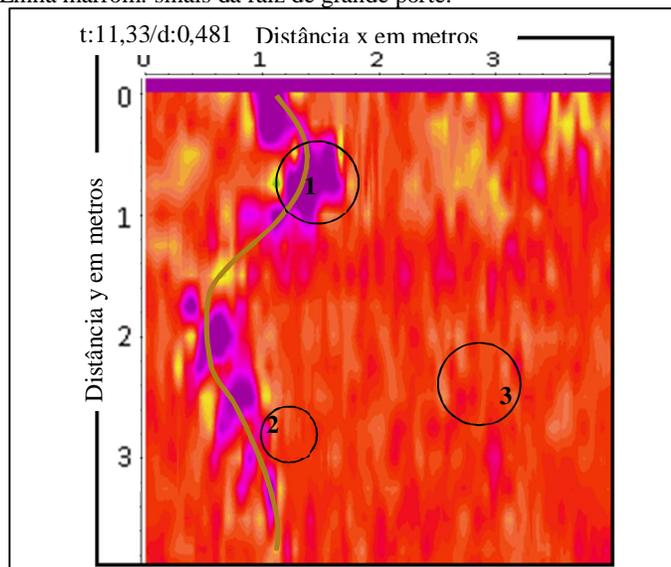
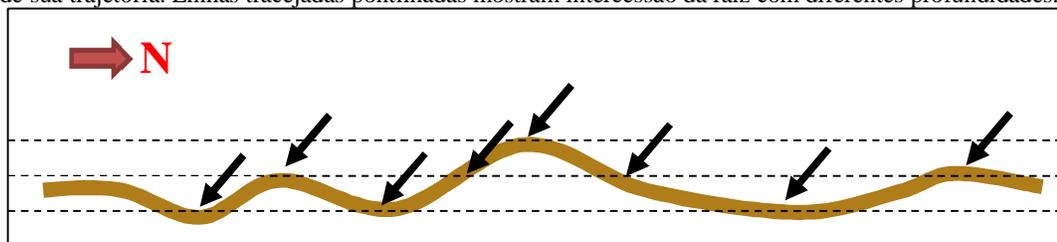


Figura 7.21– Perfil esquemático do comportamento da raiz de grande porte, mudando de profundidade ao longo de sua trajetória. Linhas tracejadas pontilhadas mostram intercessão da raiz com diferentes profundidades.



### 7.1.2 Estudo de horizontes de solo

Com o auxílio do GPR foi tentado estudar a continuidade lateral e a variação de espessura e profundidade dos diferentes horizontes descritos no item 6.2. Nos radargramas é possível reconhecer apenas a passagem entre o horizonte B e C (Figura 7.22), que ocorre entre 80 cm e 1 m. Quando a variação entre os horizontes é sutil, sua distinção não é clara, como ocorre entre os horizontes A e B. A superposição (soma) do sinal de radargramas, contudo, pode tornar mais evidente as pequenas variações, aumentando a possibilidade de se reconhecer diferentes horizontes. A superposição de todos os radargramas da área 3 torna possível identificar a interface entre os horizontes A para B, que ocorre a cerca de 30 cm de profundidade (Figura 7.23).

Figura 7.22 - Passagem do horizonte B para C comum em todos os radargramas em traçado.

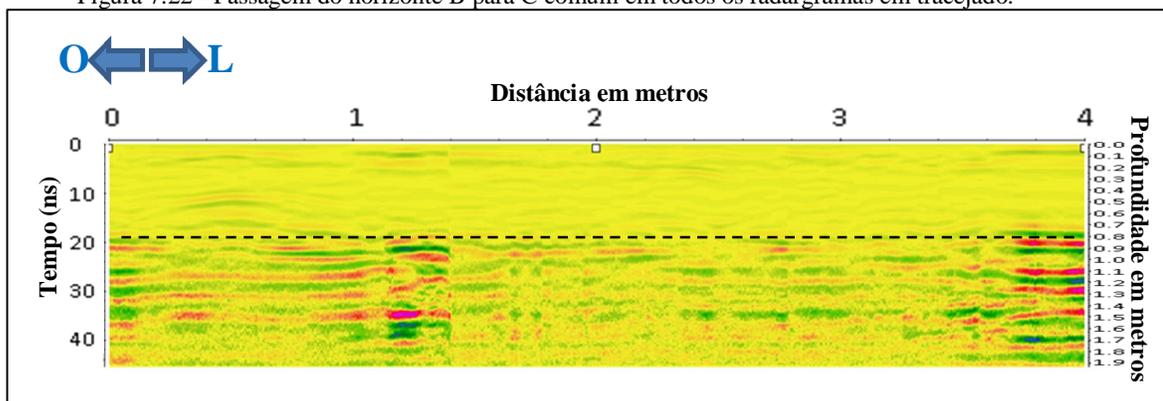
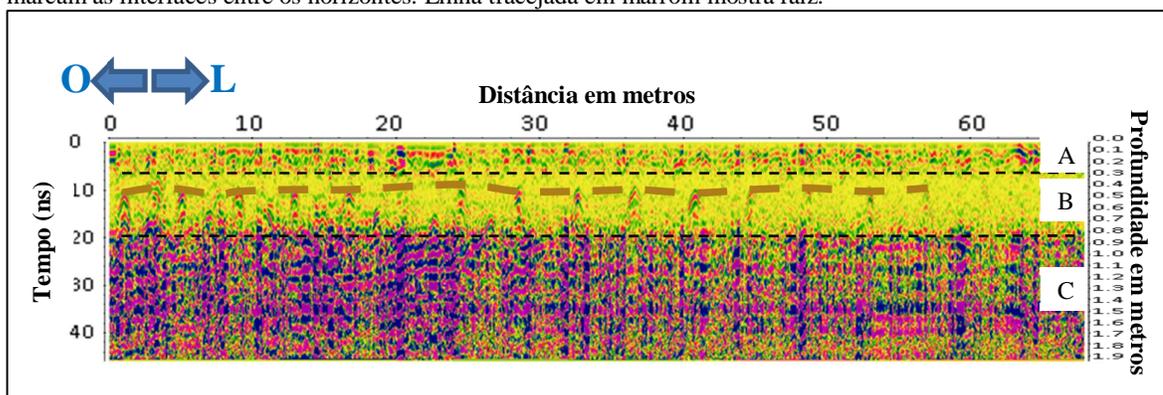


Figura 7.23 – Superposição de radargramas mostrando a passagem do horizonte A para o B. Tracejados marcam as interfaces entre os horizontes. Linha tracejada em marrom mostra raiz.

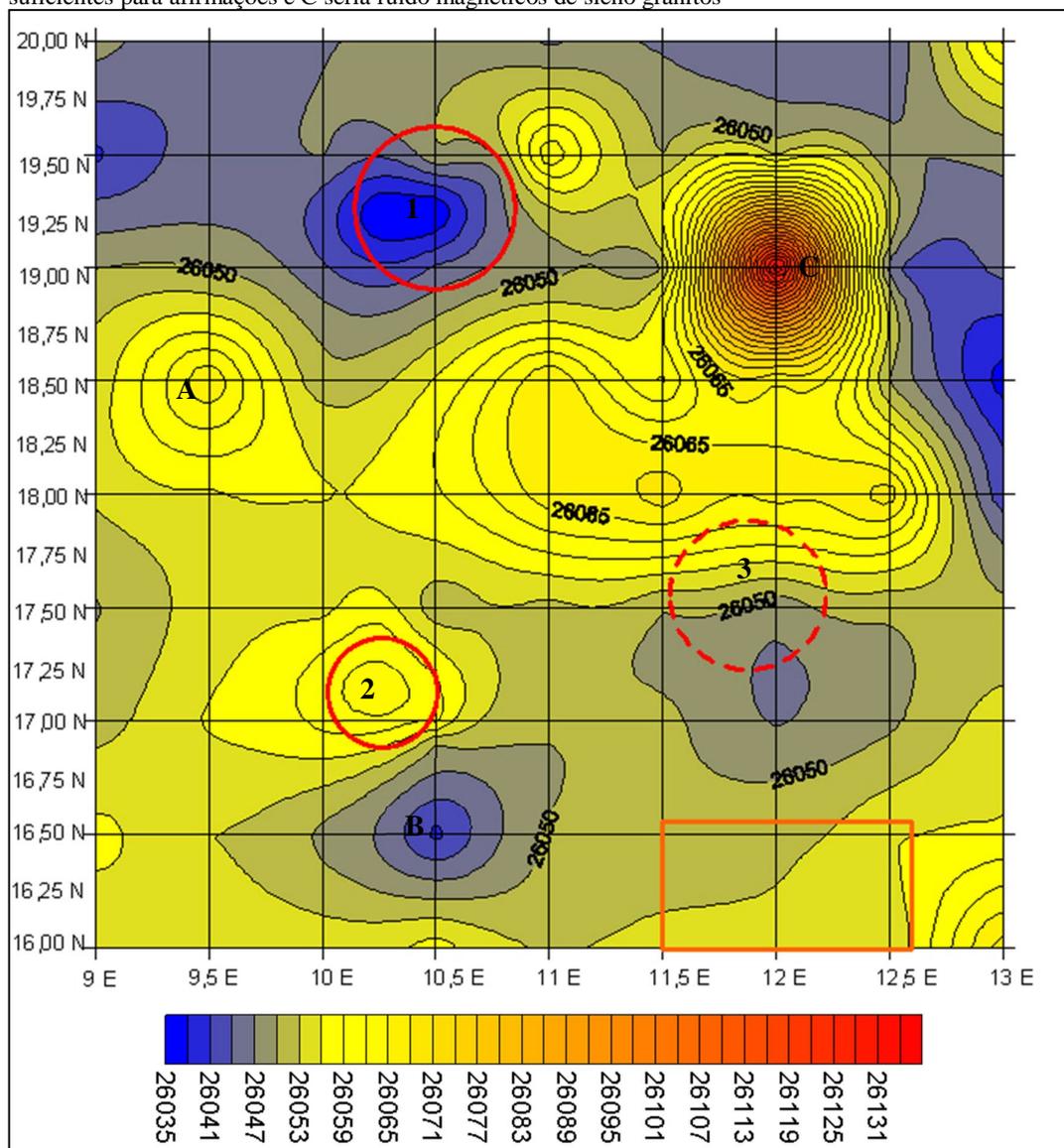


### 7.1.3 Magnetometria

Os dados de Magnetometria, após terem sido corrigidos da variação diurna, foram lançados sob a forma de mapa de contornos de isovalores magnéticos com o programa Surfer 8.0, em que três cores, azul, amarelo e vermelho, evidenciam baixos, médios e altos valores locais magnéticos (Figura 7.24).

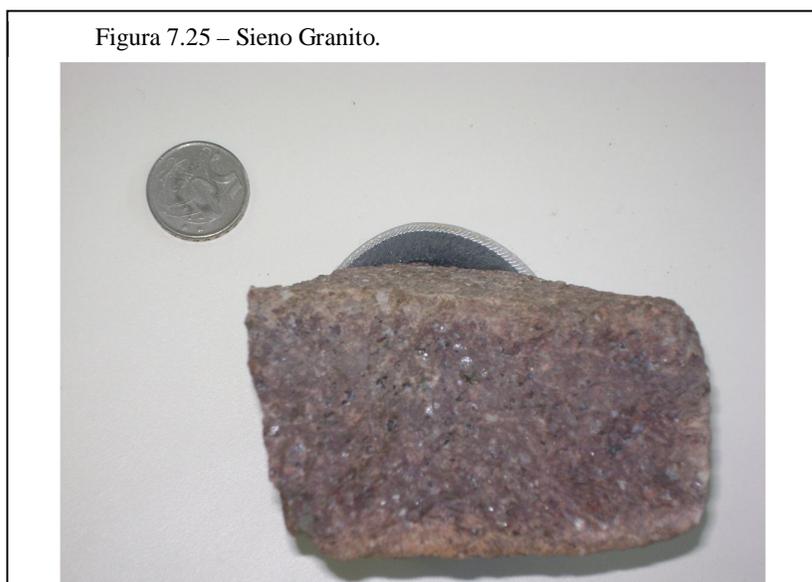
As regiões onde ocorrem as urnas aflorantes 1 e 2 coincidem com baixo e alto anômalo, respectivamente. Já na região em que pode existir uma terceira urna ocorrem valores positivos e negativos. Como as urnas foram transportadas para uma posição diferente daquela do seu cozimento, seu campo não estará alinhado com o campo terrestre, podendo gerar baixo magnético como observado sobre a urna 1 e alto magnético como observado sobre a urna 2, além de dipolos.

Figura 7.24 - Mapa de contornos de isovalores magnéticos da área 3. Círculos 1 e 2: posição das urnas aflorantes 1 e 2. Círculo 3: possível urna. A e B seria, alto e baixo (respectivamente) isolados sem dados suficientes para afirmações e C seria ruído magnéticos de sieno granitos



A anomalia muito alta assinalada com a letra C foi muito provavelmente provocada pela presença de rocha como o sieno granito encontrado no sítio (Figura 7.25). Os moradores atuais do sítio desconhecem a origem dessas rochas de tamanho variando ao redor de um punho, o que remete à hipótese de que elas foram trazidas para o local por moradores anteriores para fazer alicerces, tratando-se de rejeito de construções.

O baixo magnético que coincide com a posição da urna 1 possui em suas proximidades altos anômalos e o alto magnético sobre a urna 2 possui um baixo anômalo em suas proximidades. Os trabalhos arqueológicos anteriores mostraram que esta área é densa em material cerâmico. Logo, é possível que essas anomalias reflitam restos de urnas em suas proximidades, já que vestígios de urnas nessas posições não foram verificados pelo GPR, ou mesmo restos menores de rochas ígneas e, ainda, se tratem de dipolos distorcidos pela presença de fontes de magnetismo de menor relevância como as citadas, caso este último que também poderia explicar os resultados da Magnetometria obtidos sobre a possível urna 3.



## 7.2 ÁREA 1

### 7.2.1 GPR

A área 1 é a mais afetada por ações antrópicas e pela presença de animais domésticos (cães e gatos) e de granja (patos, gansos, galinhas e cabras), que tendem a revolver a terra. A limpeza por meio de varrição diária pelas famílias que ali vivem e viveram levaram ao desenterramento parcial das urnas e ao seu descobrimento.

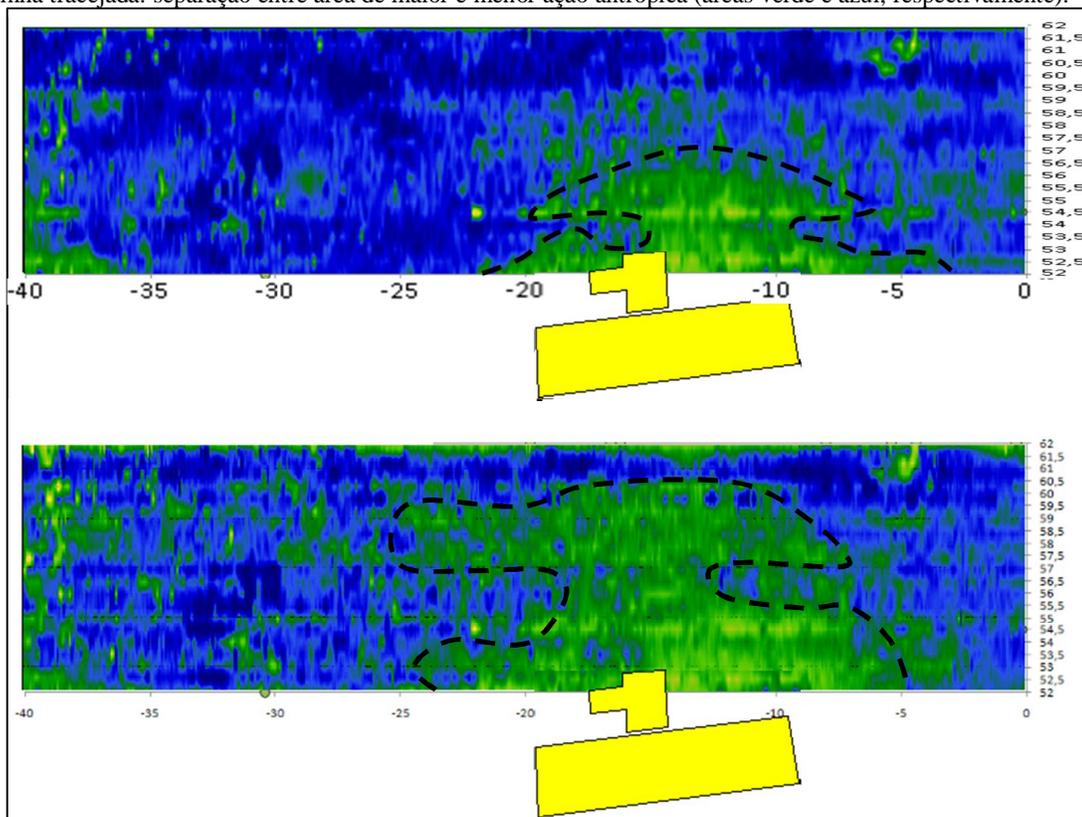
O efeito dessa ocupação foi estudado nas seções de topo obtidas do bloco diagrama 3D construído com os dados GPR, que foram submetidos ao igual processamento usado para a área 3. Ele se estende da superfície até cerca de 12 cm de profundidade e refletem a ação de gerações de pessoas que ali viveram. A Figura 7.26 mostra as seções para as profundidades de 10 e 12 cm. As áreas em verde denotariam as áreas que sofreram maior ação antrópica e as áreas em azul, menor.

Quatro das cinco urnas aflorantes foram observadas por ocasião do trabalho na área próxima à porta de entrada da casa, na área verde. Anteriormente, outras duas urnas foram desenterradas do mesmo perímetro. Quanto mais próximo à casa (em amarelo na Figura 7.26), mais o padrão verde se mantém, pois as ações antrópicas ali mais constantes provavelmente foram, tendo conduzido ao aparecimento superficial das urnas que vem sendo resgatadas. É, contudo, provável até que novas urnas ocorram e em maior abundância nas áreas azuis do que nas áreas verdes, onde elas podem fazer sem terem sido afetadas e reveladas pela ação antrópica.

A investigação detalhada foi realizada sobre os radargramas (2D) (porque as imagens 3D, devido ao processamento dos dados, em especial, a interpolação, sofrem pequenas modificações), tomando-se como base as observações obtidas para a área 3.

A Figura 7.27 mostra um detalhe do radargrama obtido para o perfil 60N, ao final da área na direção N, mais distante, portanto, da casa. Chama a atenção no radargrama a abundância de hipérboles. A densidade de hipérboles em alguns trechos é de cerca de 10 hiperboles num espaço de 7 m. Muitas dessas hipérboles estão muito próximas ou dentro da área de contraste inicial provocada pelas ondas diretas, por esse motivo optou-se por não remover o background provocados pelas ondas diretas, já que esse filtro provoca eliminação ou super-suavização das hipérboles.

Figura 7.26 - Seção GPR a profundidade de 10 cm (topo) e 12 cm (base). Amarelo: fachada da casa. Linha tracejada: separação entre área de maior e menor ação antrópica (áreas verde e azul, respectivamente).



As hipérboles são similares àsquelas de porte médio da área 3, que foram associadas a raízes de pequeno porte (item 7.1.1). A área 1, contudo, praticamente não possui árvores nem raízes aparentes, principal fonte de ruído na região.

A Figura 7.28 mostra a localização desse tipo de assinatura em toda a área 1.

Inexistem registros oficiais de como era o terreno antes da ocupação, apenas relatos do caseiro e uma foto analógica na qual aparece um morro de topo plano com densidade muito grande de floresta virgem que foi derrubada para a implantação da moradia, por meio do corte dos troncos rente ao chão, de forma que as raízes teriam permanecido intocadas, provavelmente formando uma rede entrelaçada em subsuperfície. A presença de raízes de diâmetro de 3 cm ou menores foram comprovadas tanto pelas ações de resgate da equipe de arqueologia quanto por escavações da própria equipe de geofísica tanto para caracterização dos sedimentos (item 6.1) quanto para o teste de velocidade (item 6.2). Paleoraízes, portanto, são, provavelmente, a causa da grande maioria das hipérboles.

Figura 7.27 - Detalhe do radargrama obtido no perfil 60N mostrando a densidade de hipérboles. Em A com escala de cores e B com escala de tons de cinza.

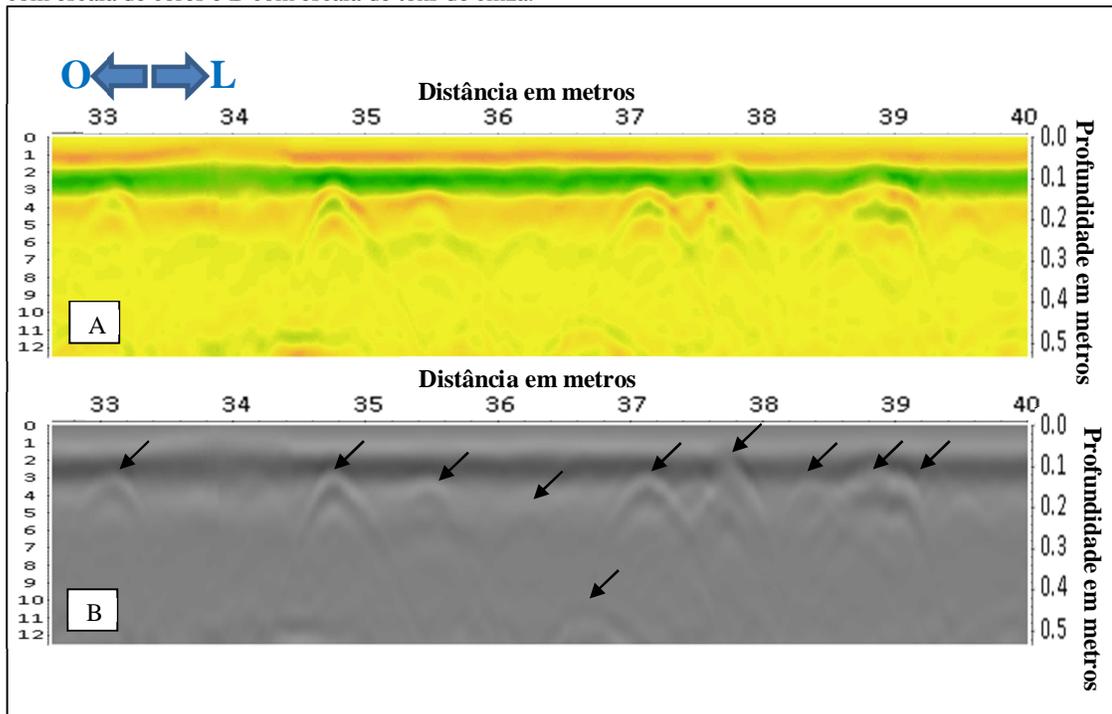
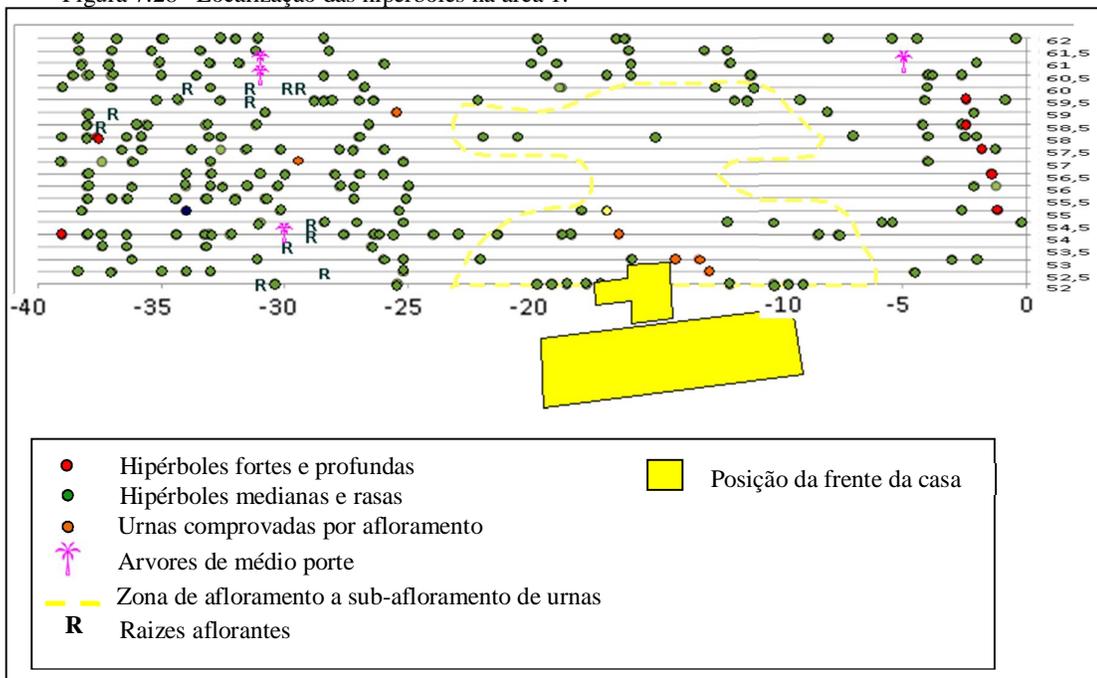


Figura 7.28- Localização das hipérboles na área 1.



### 7.2.2 Magnetometria

Os dados magnéticos, após corrigidos da variação diurna, foram reunidos sob a forma de mapa de isocontornos magnéticos, mostrados na Figura 7.29. A Figura 7.30 mostra os mesmos dados sem acentuar os altos anômalos de cerca de 300 vezes o background que mascaram anomalias menores, interpretados no item 7.1.2 como rochas ígneas de cerca do tamanho de um punho, ou seja, a figura enfatiza variações menores. A Tabela 7.1 reúne breve descrição sobre as anomalias encontradas em ambas as figuras citadas. Optou-se por usar uma escala de apenas duas cores pois identificou-se assim uma melhor caracterização do que se deseja avaliar, apesar de não ter o amarelo como intermediário como se usou na área 3 ainda se mantém o padrão de vermelho para os ais altos e azul para os mais baixos.

Figura 7.29 - Mapa de contornos de isovalores magnéticos da área 1. Círculos laranja: posição das urnas aflorantes a subaflorantes. Letras: zonas anômalas assinaladas por retângulos vermelhos.

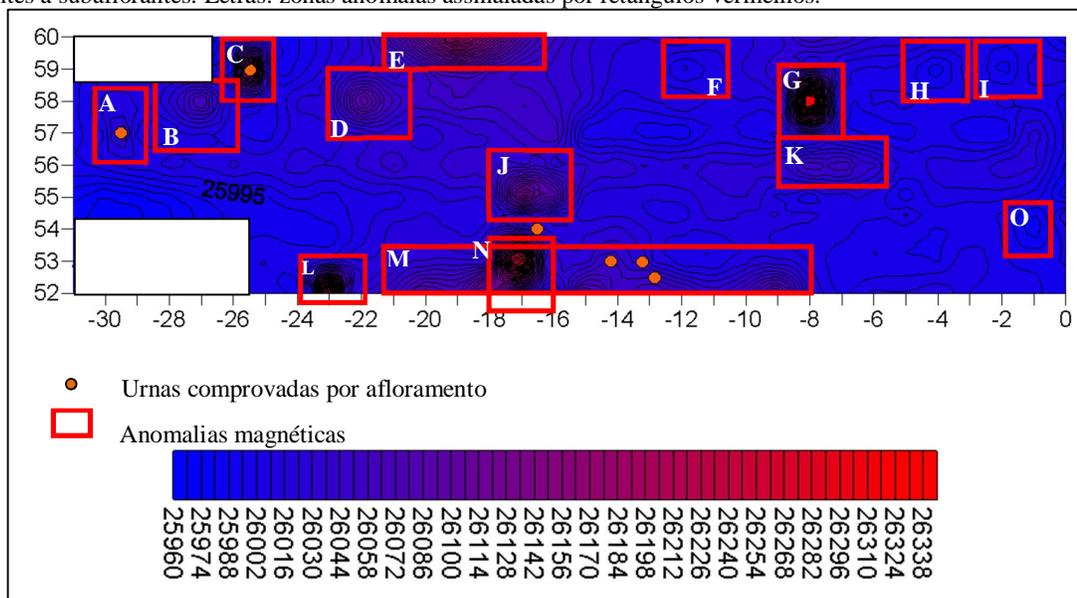
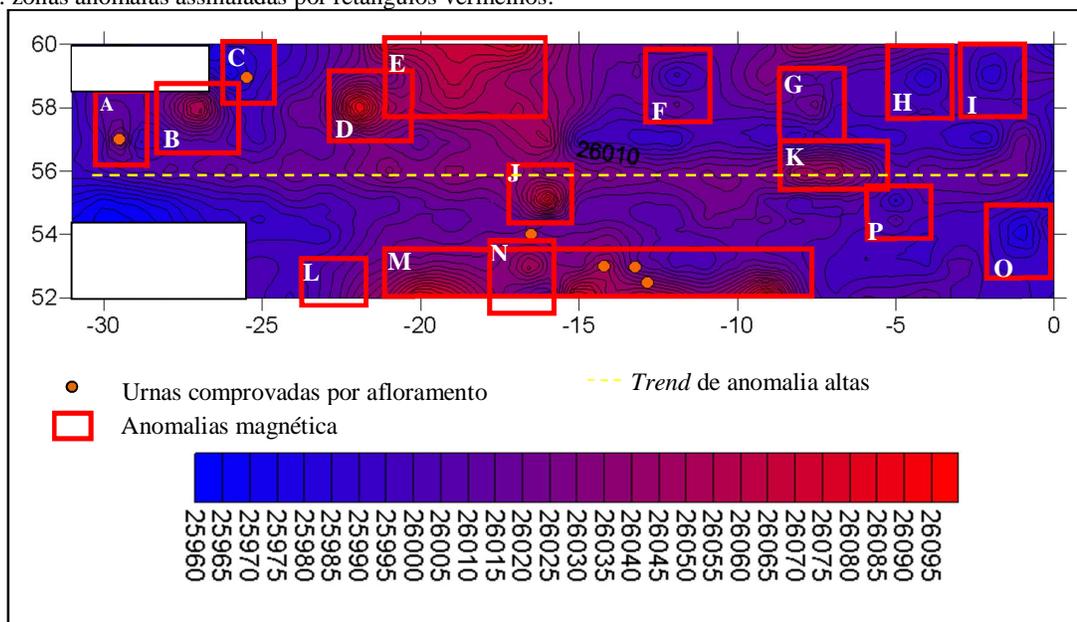


Figura 7.30 - Mapa de contornos de isovalores magnéticos da área 1 com a escala ajustada para não enfatizar as anomalias ligadas a restos de rochas. Círculos laranja: posição das urnas aflorantes a subaflorantes. Letras: zonas anômalas assinaladas por retângulos vermelhos.



Um curioso *trend* marcado por uma linha pontilhada amarela na figura 7.30, seria talvez uma região rica em urnas, os dados de GPR não mostram nenhuma anomalia considerável, é possível que sejam urnas muito pequenas na área “cega” ao GPR, o *trend* possui uma notável linearidade.

O resultado da integração dos resultados obtidos com o GPR (Figura 7.28) com os resultados obtidos com o Método Magnético das Figuras 7.29 e 7.30 é apresentado nas Figuras 7.31 e 7.32, respectivamente. A integração de resultados foi feita com base no seguinte critério: as anomalias magnéticas conservadas são aquelas que coincidem com anomalias de GPR, ainda que centro de anomalia magnética ou de GPR estejam algo deslocadas entre si, pois, como observado no estudo da Área 3, a assinatura GPR de interesse pode, provavelmente, estar associada a anomalia magnética algo deslocada espacialmente ou a borda de anomalia magnética.

Tabela 7.1 - Descrição das anomalias observadas nos mapas de isocontornos magnéticos 7.29 e 7.30. A cor cinza destaca as anomalias sem interesse por representarem ruído geológico (restos de rocha) e o símbolo ☪, anomalias geradas por cerâmica que serão excluídas da lista de anomalias geofísicas.

Anomalia	Mapa de isocontornos	Mapa de isocontornos sem enfatizar anomalias associadas a restos de rocha
☪ A	Baixo associado a urna pequena	
B	Alto isométrico	
☪ C	Alto associado a urna pequena urna	
D	Alto isométrico	
☪ E	Alto alongado. Superficialmente: muitos fragmentos de cerâmica varridos para o local e suas imediações. Impossível comprovar a extensão dessa anomalia para N devido a limites físicos (galinheiro, chiqueiro, canil, etc.).	
F	Baixo	Dipolo
G	Alto elevado associado a rocha	Alto associado a rocha
H	Baixo	
I	Baixo	
J	Alto	
K	Alto	
L	Alto elevado associado a rocha (ponto de coleta de rocha)	Alto associado a rocha (ponto de coleta de rocha)
M	Alto alongado associado a urnas no perfil 52; deve se estender para S e indicar urnas embaixo da casa	
N	Alto elevado associado a rocha (ponto de coleta de rocha)	Alto associado a rocha (ponto de coleta de rocha)
O	Baixo	
P	-	Dipolo

Na área de 300 m<sup>2</sup>, com a Magnetometria (Figuras 7.29 e 7.30) foi possível selecionar 16 áreas menores de interesse (áreas das anomalias de A até P resumidas na Tabela 7.1). O estudo dos possíveis ruídos, no caso ruído geológico provocado por restos de rocha presentes, destacados com cinza na Tabela 7.1, permitiu excluir anomalias provocadas por esses ruídos e reduzir o número de áreas potencialmente favoráveis para a descoberta de utensílios arqueológicos para 13. O reconhecimento do terreno, por sua vez, permitiu a exclusão de anomalias provocadas por urnas aflorantes ou restos líticos, marcadas com o símbolo ◐ na Tabela 7.1, reduzindo-se o número de anomalias de interesse para 10. Finalmente, os resultados de GPR permitiram excluir 2 anomalias magnéticas (K e O da Tabela 7.1), reduzindo o total de anomalias para 8.

A Tabela 7.2 resume as diferentes etapas da metodologia de eleição de anomalias para escavação.

Cada anomalia é uma região de escavação em potencial, porém, elas definem áreas, como a anomalia P que tem 1 m<sup>2</sup> ou a anomalia C com 2 m<sup>2</sup>, cujas dimensões podem ser refinadas por meio do GPR, numa segunda etapa de campo. A anomalia P, por exemplo, pode ter sua área reduzida em até ¼ para a escolha de ponto de partida das escavações como mostra a Figura 7.33, o que não exclui a possibilidade de que haja artefatos cerâmicos nos outros ¾, mas a reduz consideravelmente. Finalmente, com os dados GPR pode-se, ainda, estimar a profundidade dos corpos que provocaram essas anomalias, o que é mostrado na Tabela 7.3.

Figura 7.31 - Mapa de classificação das anomalias magnéticas sobre o mapa de isocontornos da área 1.

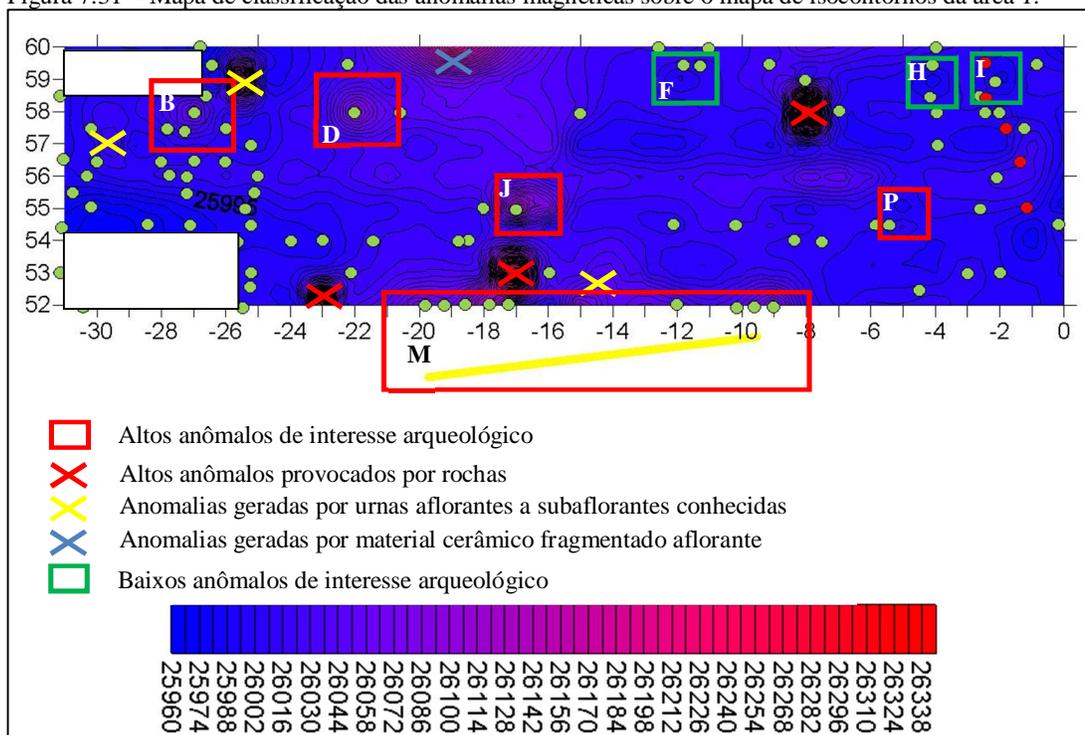


Figura 7.32 - Mapa de classificação das anomalias magnéticas sobre o mapa de isocontornos da área 1 com a escala ajustada para não enfatizar as anomalias ligadas a restos de rochas.

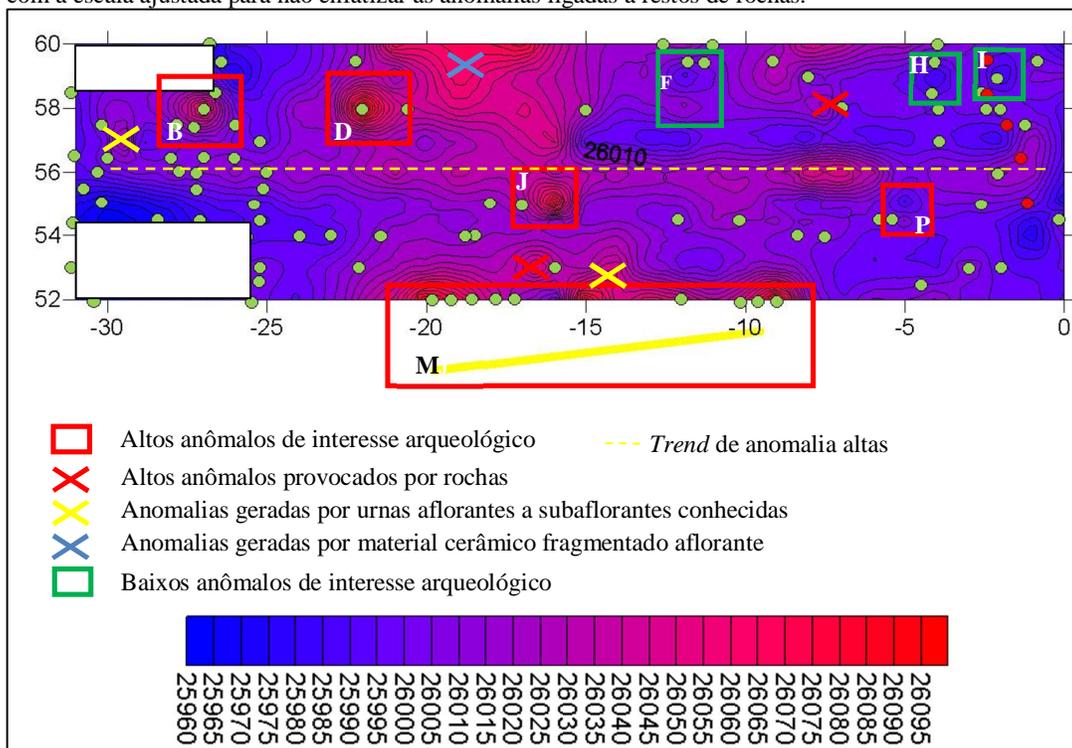


Tabela 7.2 - Anomalias potencialmente favoráveis para a descoberta de utensílios arqueológicos	
Anomalias	Base da Seleção
16	Magnetometria
-3	Identificação de ruído geológico
-3	Localização de urnas aflorantes a subaflorantes
-2	GPR
Total: 8	

Figura 7.33 - Seleção de área para escavação dentro de zonas anômalas.

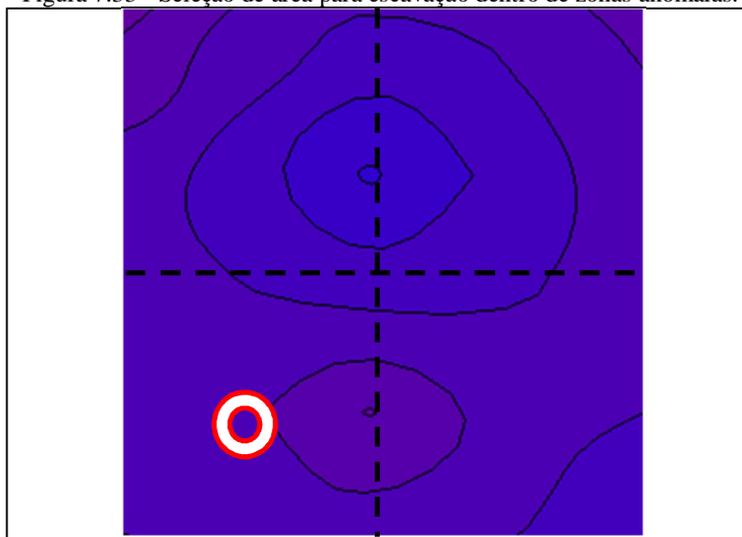


Tabela 7.3 - Profundidade das anomalias selecionadas obtidas por meio do GPR	
Anomalia	Profundidade (cm)
B	10
C	10
F	30
H	30
I	10, 50
J	10
P	10
M	10

### 7.3 ÁREA 2

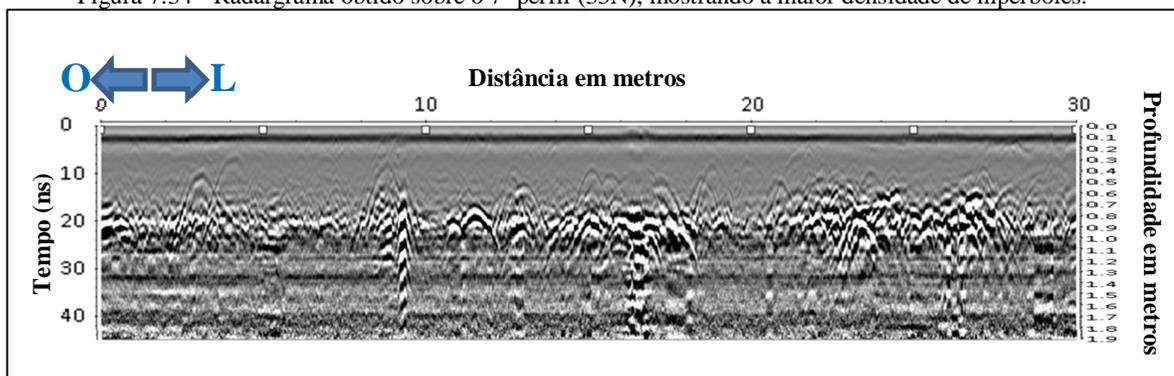
#### 7.3.1 GPR

A área 2 foi a única das 3 áreas levantada apenas com o GPR. Os dados obtidos foram submetidos ao mesmo processamento usado para a área.

A investigação detalhada foi realizada sobre os radargramas (2D). A análise das seções de topo obtidas do bloco diagrama 3D construído com os dados GPR não foi significativa.

Os radargramas possuem hipérboles em excesso, como ilustra o radargrama mostrado na Figura 7.34. Essas hipérboles se diferenciam daquelas encontradas na área 1 (Figura 7.27), porque ocorrem com maior frequência, muitas vezes de modo aglomerado, e são mais visíveis e grandes.

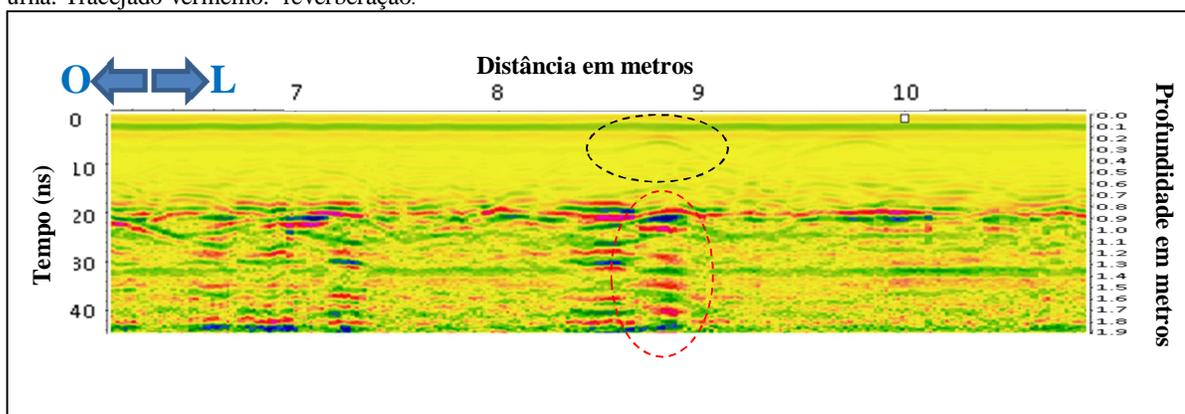
Figura 7.34 - Radargrama obtido sobre o 7º perfil (33N), mostrando a maior densidade de hipérboles.



Toda hipérbole cujo topo encontra-se próximo a 1 m foi interpretada como raiz. O padrão de enterramento, mesmo que este tenha sido realizado por diferentes gerações, sugere que é o de enterramento relativamente raso.

Hipérboles acompanhadas de reverberações, geradas por raízes, protuberâncias do terreno e oscilações que tiram o equipamento de sua posição de acoplamento com a superfície, foram também descartadas. A Figura 7.35 mostra um detalhe do perfil 13 (36N) com uma hipérbole pequena que poderia ser associada a uma urna e que foi descartada pela reverberação que existe logo abaixo da mesma.

Figura 7.35– Hipérbole pequena (tracejado preto) facilmente confundida com hipérbole provocada por urna. Tracejado vermelho: reverberação.



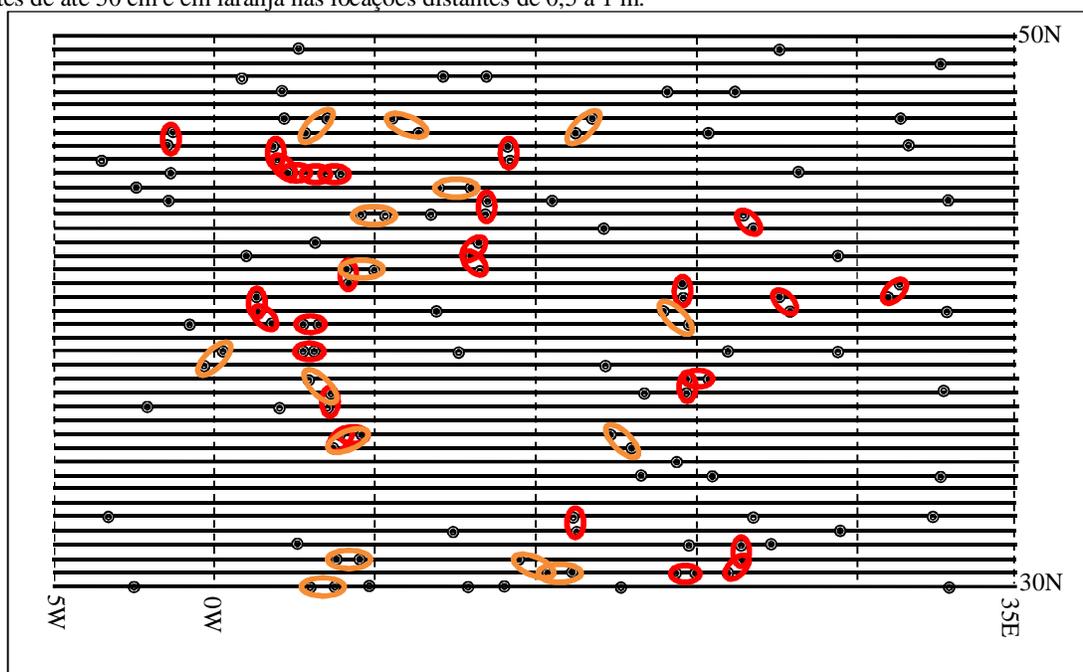
Hipérboles grandes com laterais com abertura a partir de cerca de 1 m foram também interpretadas como raízes, com base em observações realizadas na área 3 (Figura 7.2).

Feições horizontais a sub-horizontais não foram observados na área 2 como se esperava. As urnas presentes nesta área possivelmente não são grandes como aquelas encontradas na

área 3, oferecendo assim hipérboles isoladas. As hipérboles relacionadas às urnas seriam, portanto, aquelas pequenas, não muito bem formadas, sem reverberação.

Os critérios de exclusão das hipérboles mencionados permitiram reduzir, em média, de 25 para 3,2 hipérboles de interesse por perfil. A locação dessas hipérboles sobre os perfis da área 2 permitiu compor um mapa com as localizações potencialmente favoráveis para a descoberta de urnas, apresentada na Figura 7.36. É possível associar locações próximas como mostrado na figura, o que pode significar aglomerados mais próximos de possíveis pequenas urnas.

Figura 7.36 - Mapa das localizações potencialmente favoráveis para a descoberta de urnas na área 2. Pontos: projeção na superfície do terreno das hipérboles selecionadas. Círculos em vermelho nas locações distantes de até 50 cm e em laranja nas locações distantes de 0,5 a 1 m.



## 8 CONCLUSÕES

A interação entre a Magnetometria e GPR foi satisfatória para a eleição e redução de áreas mais prováveis a conter urnas, porém existe uma incerteza quanto ao posicionamento das urnas visto que há uma zona cega estimada até cerca de 10 cm de profundidade nos registros com o GPR, que pode levar à perda de urnas aflorantes a subaflorantes de altura inferior a 10 cm. A zona de sombra não afeta todo o possível sinal das urnas aflorantes, pois algumas possuem altura entre 20 e 30 cm. Processamentos outros podem se mostrar mais eficazes..

Outro entrave para o trabalho na área reside na frequência de amostragem. Segundo o princípio de Nyquist, erros relacionados a aliasing são evitados quando a distância entre os perfis é menor do que a metade do objeto investigado. Há, contudo, urnas de tamanhos variáveis. O ideal, então, seria utilizar a distância entre perfis igual à metade da menor urna, o que no campo seria inviável visto que as menores urnas têm 20 cm, o que exigiria uma quantidade grande de perfis para recobrir o terreno, inviável de ser levantada no tempo restrito para o levantamento de campo. O espaçamento utilizado entre perfis de 50 cm é ideal para não perder urnas grandes, de diâmetro de pelo menos 1 m. Além disso com uma antena de 400 MHz com velocidade de onda de 0,085 m/ns em meio argiloso (0,04 m/ns) gera um comprimento de onda na faixa de 0,2 m ou seja, urnas abaixo de 20 cm de diâmetro provavelmente não seriam percebidas no radargrama.

O terreno sedimentar amazônico é argiloso, atenuando a onda, algo que se tornou de extrema importância devido aos tamanhos reduzidos de algumas urnas, que podem ser facilmente confundidas com raízes de menor porte se não observadas corretamente. O ideal seria a utilização de equipamentos de maior resolução como GPR de maior frequência que poderiam investigar urnas menores e Gradiômetros que poderiam individualizar melhor anomalias magnéticas de pouca variação como foram as encontradas neste trabalho.

Para estimar corretamente a eficácia dos métodos aplicados nas condições das urnas estudadas, seria necessária a escavação dos terrenos potencialmente delimitados, posicionando espacialmente as urnas escavadas com as anomalias geofísicas encontradas.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. M. **Estudo da contaminação por hidrocarbonetos em postos de serviços do município de Abaetetuba- PA utilizando georadar.** 2007. 144 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

AITKEN, M.J; **Physics and archaeology.** 2 ed. Oxford: Claredon Press, 1974. 181 p.

ALVES, J. J. A. **Métodos geofísicos aplicados à arqueologia no estado do Pará.** 1979. 55 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém, 1979.

ALVES, J. J. A; LOURENÇO, J. S. Métodos Geofísicos aplicados à arqueologia no estado do Pará. **Boletim do museu paraense Emílio Goeldi**, Série geologia, n. 26, p. 1–52, 1981.g

ARAGÃO, R. C. **Metodologia geofísica aplicada à pesquisa de salvamento arqueológico nos sítios Bittencourt, Jambuaçu e Jaburu, estado do Pará.** 2006. 60 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

ARAGÃO, R. C; Metodologia geofísica aplicada ao estudo arqueológico dos sítios Bittencourt e Jambuaçu, Estado do Pará. 2010 **Rev. bras. geof.** vol.28 no.2 São Paulo Apr./June 2010

ARAGÃO, R. C. ; LUIZ, J. G. ; LOPES, P. R. C. ; **Metodologia geofísica aplicada ao salvamento arqueológico de área adjacente a mineroduto no nordeste do Pará.** in: 9th International congress of the brazilian geophysical society, 2005, Salvador. explore new ideas in a mystical place, 2005. v. 1. p. 1-6.

BEVAN, B.W. & ROOSEVELT, A.C. Geophysical exploration of guajará, a prehistoric earth mound in Brazil geoarchaelogy: **An international jornal** , V.18; N.3; Pag. 287-331; 2003.

BARRADAS, J. A.; SCHAAN, D. P.; LUIZ, J.G. **Magnetic and GPR survey to identify archaeological features on Cacoal site, anajás river, Marajó island, Pará, Brazil.** In:Congresso internacional da sociedade brasileira de geofísica, 6.; 1999, Rio de Janeiro.

BLUM M.L.B. **Técnicas de tratamento de dados geofísicos** ;cap. 4; Tese de doutoramento Nº 30 – IG/UnB-1999

BORGES, W. R. **Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletroresistividade.** 2002. 60 f. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589 p.

CATETE, C. P. **Investigações ambiental e forense com os métodos geofísicos radar de penetração do solo (GPR) e polarização induzida (IP) no cemitério do Tapanã, Belém/Pará.** 85 f. Dissertação de mestrado – Universidade federal do Pará, Belém, 2009.

DANIELS, D. J. **Ground penetrating radar 2nd edition.** London: The institution of electrical engineers. 761 p. 1996

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, **Geophysical prospecting**, v.37, p. 531-551. 1989.

GSSI. Antenas: **The difference is the data.** [s.l]: 2006, 4f. Acesso em: [www.alphageofisica.com.br](http://www.alphageofisica.com.br).

GLATZMAIER, G.A.; **Geodynamo simulations—how realistic are they? Annual review of earth and planetary sciences** Vol. 30;Pag.237-257,May 2000)

GALLAS, J. D. F.; TAIOLI, F. **Métodos Potenciais.** 2004. Belém; UFPA; PPGF;2004 (apostila)

HARTMANN G.A.; Arqueomagnetismo e datação arqueomagnética: princípios e métodos; **Revista do museu de arqueologia e etnologia**, São Paulo, N.17;Pag. 445-459. 2007.

JUCA, E.J.C.A.; **Análise de campos magnéticos a partir da componente norte**, Salvador, 1973. Dissertação de mestrado – Universidade Federal da Bahia; 1973

LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. da C. **Curso de prospecção geofísica.** Belém: Universidade Federal do Pará, 1983. 263 p.

LUIZ, J.G.; SILVA, L. M. da C.; **Geofísica de prospecção.** Belém: UFPA/ CEJUP, 1995. 311p.

LUIZ, J. G. **Notas de aulas de método georadar.** Belém: Universidade Federal do Pará, 1998. 8 p.

LUIZ, J. G. ; PEREIRA, E. S. Prospecção arqueológica por métodos geofísicos no sudeste do Pará: O caso do sítio Domingos, Canaã dos Carajás.. In: International Congress of the Brazilian geophysical society 9th, 2005. **Explore new ideas in a mystical place**, 2005. v. 1. p. 1-6; Salvador : SBGF, 2007

LUIZ, J. G.; ARAGÃO, R. C.; LOPES, P. R. do C. **Métodos magnético e cintilométrico aplicados ao salvamento arqueológico do sítio Jaburu do rio Paru.** In: **International congress of the Brazilian geophysical society**, 10., 2007, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2007.

MELO, M.S; **Geofísica aplicada à arqueologia: investigação no sítio histórico engenho Murutucu, em Belém, Pará** - Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Pará, Instituto de geociências, 2007.

MARQUES, F.L.T. **Modelo da agroindústria canavieira colonial no estuário amazônico: Estudos Arqueológicos dos engenhos dos séculos XVIII e XIX** . 2004. 193 f (Tese: Doutorado em história) Pontifícia universidade do Rio do Grande do Sul, Porto Alegre 2004

MIRANDA, J.M; **Introdução ao Geomagnetismo**, Centro de geofísica de Lisboa. 2009.

NASCIMENTO, W. G. **Investigação geofísica ambiental e forense nos cemitérios do Bengui e do Tapanã** (Belém - PA) . 153 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

NEVES, E. G. **Arqueologia da amazônia**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 2006. 86 p.

Observatório Nacional: Site Interativo – <http://obsn3.on.br/~jlk/magdec/index.html>; 2010.

OLHOEFT, G. R. **Application of ground penetrating radar**: in Proceedings of the 6th Int'l. Conf. on Ground Penetrating Radar, GPR'96, Sendai. 1996. 4 p.

ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica por campos variables**. Madri, Paraninfo. 1974. 561 p.

REYNOLDS, J. M. **An Introduction to applied and environmental geophysics**, John Wiley e sons LTD, New York, 1997. 796p.

REZENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. São Paulo: Livraria da física, 2004. 547p.

ROOSEVELT, A. C. **Moundbuilders of the amazon: geophysical archaeology on Marajo island**, Brazil. San Diego: Academic press, 1991. 495 p.

ROOSEVELT, A. C., M. Lima da Costa, C. Lopes Machado, M. Michab, N. Mercier, H. Valladas, J. Feathers, W. Barnett, M. Imazio Da Silveira, A. Henderson, J. Sliva, B. Chernoff, D. S. Reese, J. A. Holman, N. Toth, K. Schick. 1996. **Paleoindian cave dwellers in the Amazon: the peopling of the Americas**. Science 272:373-384.

SCHAAN, D., Bueno, M., Ranzi, A. **Geoglifos do Acre: novos desafios para a arqueologia amazônica**. Amaz'Hommes - Sous la direction de Egle Barone-ViSigalli & Anna Roosevelt. 2010.

Smemoe C.M.; **Processing and visualization of ground penetrating radar data for assessing natural hydrogeologic conditions; civil and environmental engineering** 540 - Term Paper;Brigham Young University 2000

SANDMEIER, K. J. REFLEXW Version 4.2, Windows 9x/2000/NT. **Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do software**, Karlsruhe, Germany. 2006. 209 p.

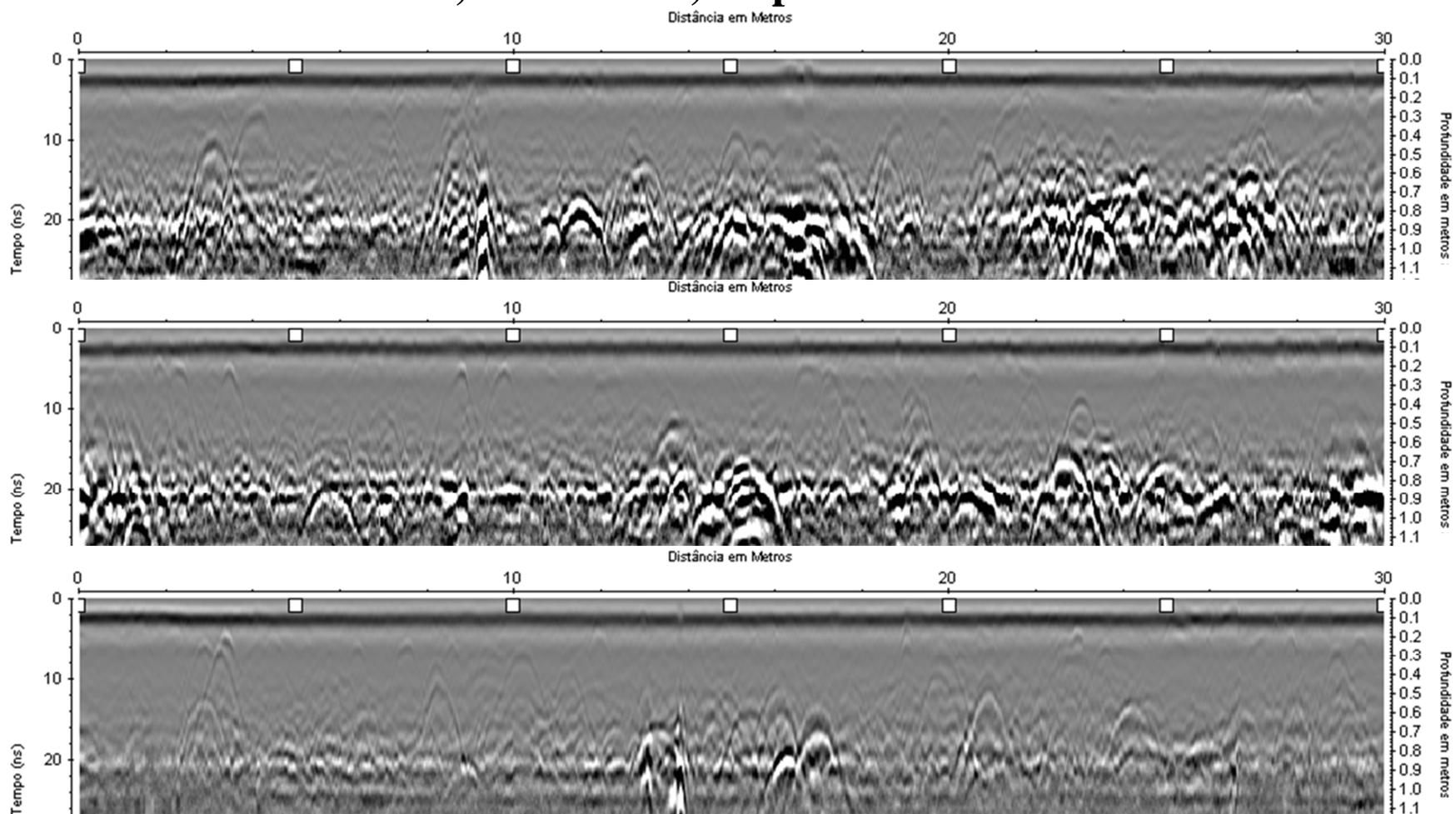
SILVA, J. B. C. **Métodos Potenciais: magnetometria**. [s.l.]: CPRM, 1986.

SOUZA, O.T.L.; **Magnetismo de rochas vulcânicas terciárias no nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém, 1986.

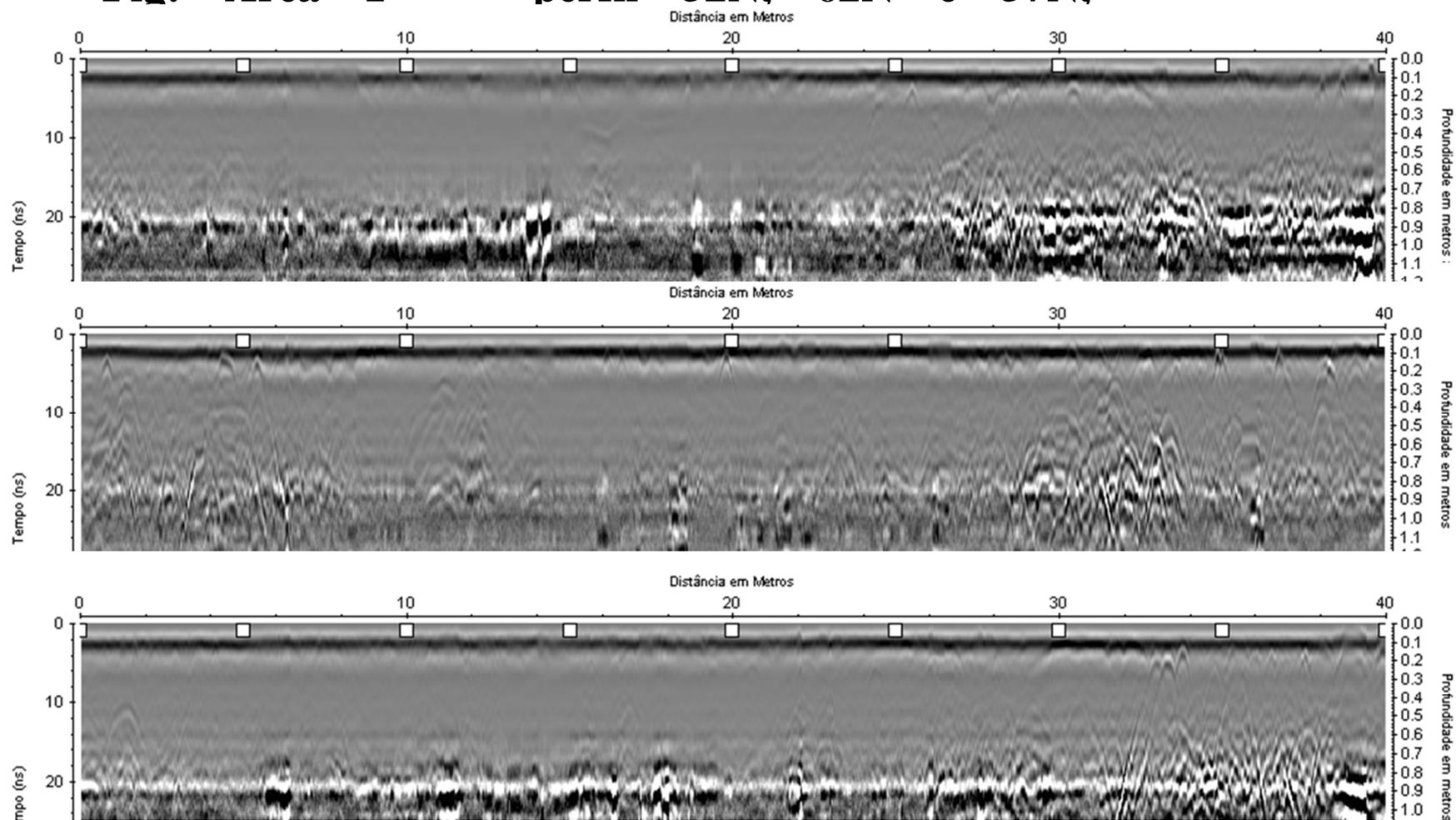
TEIXEIRA, W; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Orgs.) **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000. 568 p.

# **ANEXOS**

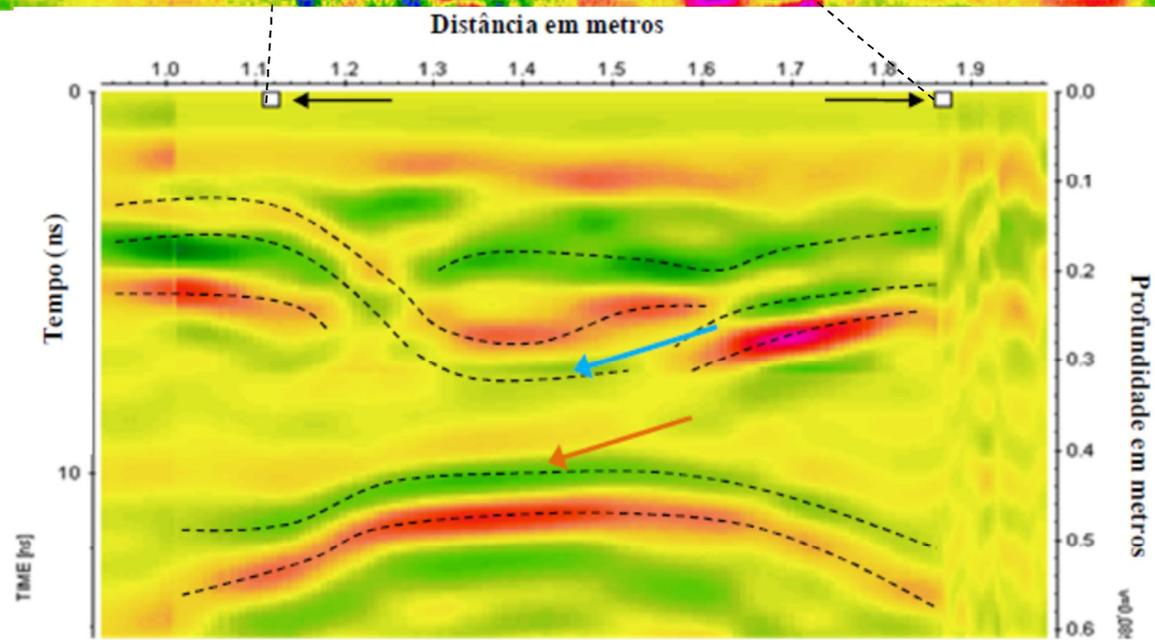
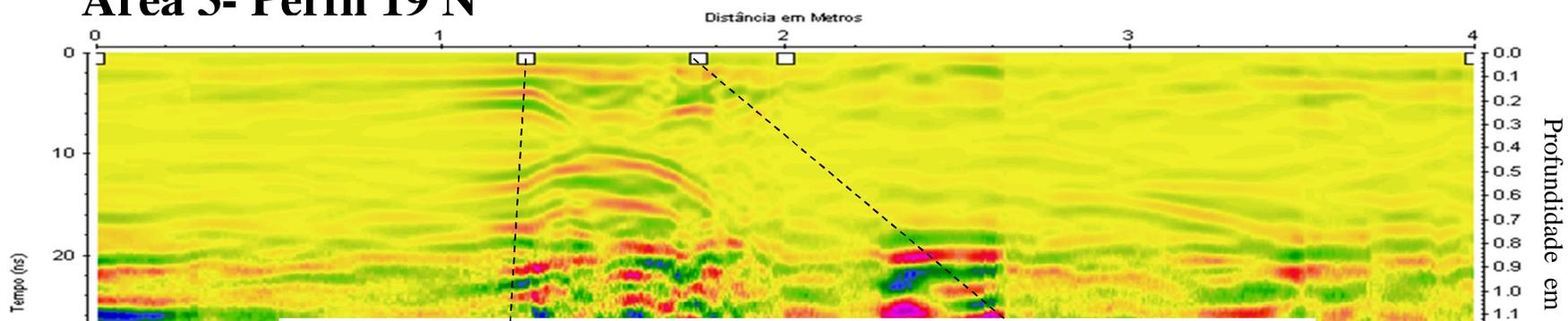
## Perfis: Área 2- 33N, 39N e 47N ,Respectivamente.



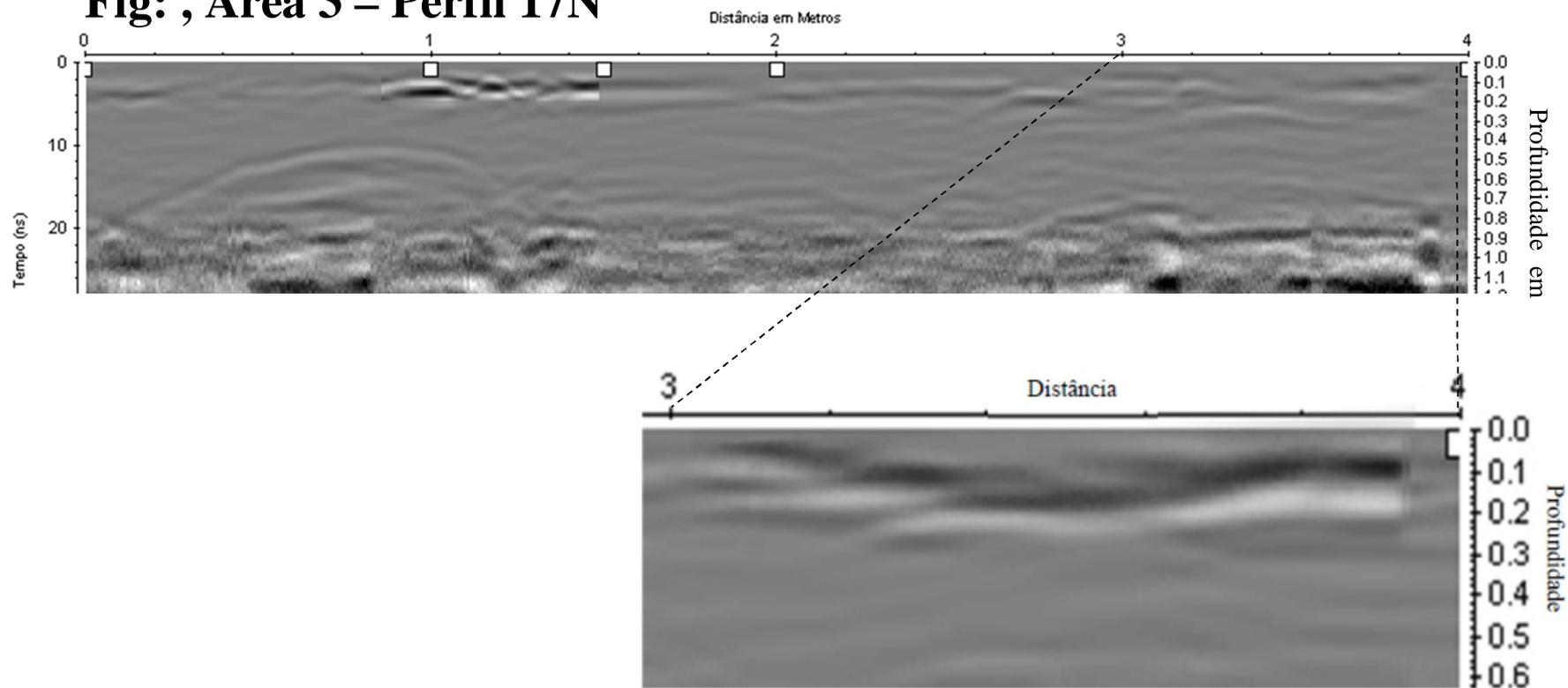
**Fig: Área 1 - perfil 52N, 62N e 57N,**



## Área 3- Perfil 19 N

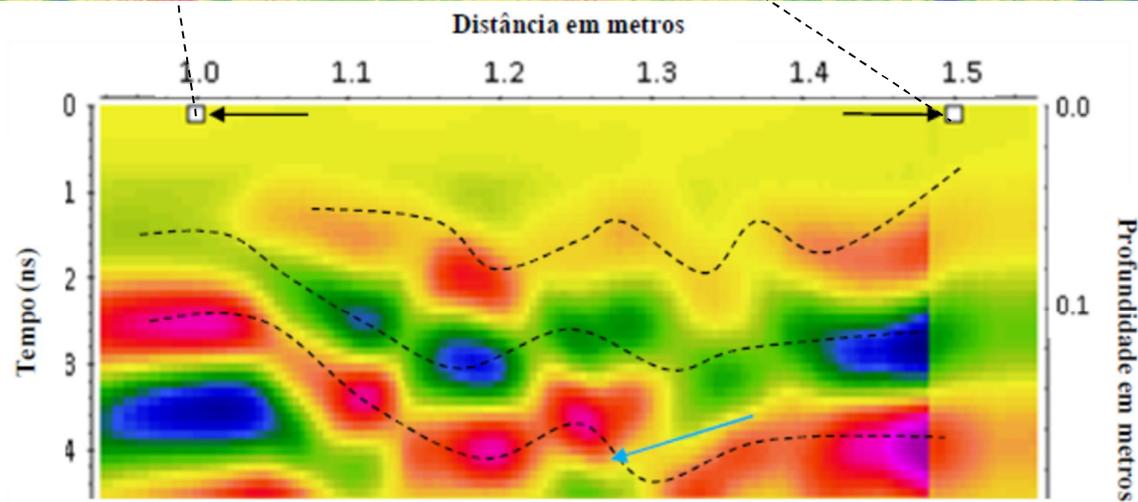
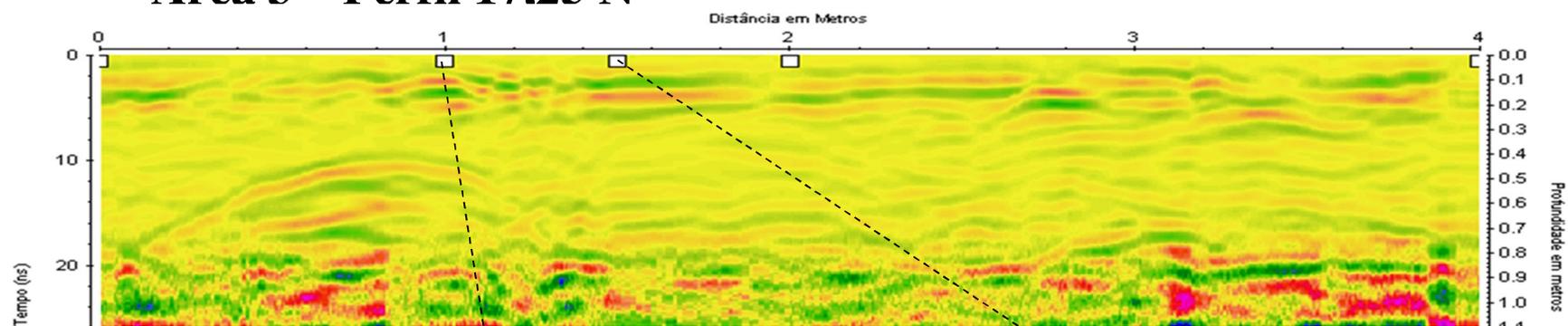


Estrutura de contraste elevado no radargrama 19N que passa pela urna 1.  
 Setas pretas: bordas da urna. Seta azul: fundo da urna com aspecto de hipérbole invertida.

**Fig: , Área 3 – Perfil 17N**

Detalhe do perfil 17,5N mostrando provável urna não aflorante.

## Área 3 – Perfil 17.25 N



Estrutura de contraste elevado no radargrama 17,25N que passa pela urna 2.  
 Setas pretas: bordas da urna. Seta azul: fundo da urna com aspecto de hipérbole invertida.