



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

DANUSA MAYARA DE SOUZA

**GPR APLICADO À ARQUEOLOGIA NAS ÁREAS DO PORTO DA
CARGILL (SANTARÉM/PA) E NO PALACETE FACIOLA (BELÉM/PA)**

BELÉM

2012



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

DANUSA MAYARA DE SOUZA

**GPR APLICADO À ARQUEOLOGIA NAS ÁREAS DO PORTO DA
CARGILL (SANTARÉM/PA) E NO PALACETE FACIOLA (BELÉM/PA)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará – UFPA em cumprimento às exigências para a obtenção de grau Mestre em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. José Gouvêa Luiz

**BELÉM
2012**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

- S729g Souza, Danusa Mayara de
GPR aplicado à arqueologia nas áreas do porto da Cargill (Santarém/PA) e no Palacete Faciola (Belém/PA) / Danusa Mayara de Souza; Orientador: José Gouvêa Luiz – 2012
60 fl.: il.
Dissertação (mestrado em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2012.
1. Geofísica. 2. Método GPR. 3. Arqueologia. 4. Palacete Faciola. 5. Sítio PA-ST-42. 6. Escavações. I. Luiz, José Gouvêa, oriente. II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

DANUSA MAYARA DE SOUZA

**GPR APLICADO À ARQUEOLOGIA NAS ÁREAS DO PORTO DA
CARGILL (SANTARÉM/PA) E NO PALACETE FACIOLA (BELÉM/PA)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para a obtenção de grau Mestre em Geofísica.

Data de aprovação: ___/___/___

Conceito: _____

Banca examinadora:

Prof. José Góvêa Luiz
Prof. José Góvêa Luiz - Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. Marcos Welby Correa Silva
Prof. Marcos Welby Correa Silva – Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof.ª Denise Pahl Schaan
Prof.ª Denise Pahl Schaan – Membro
Ph.D. em Antropologia Social
Universidade Federal do Pará

*À Maria do Socorro Costa de Souza,
grande mulher, mãe e amiga.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu amado Jesus Cristo pela força para continuar a caminhar em meio a tantas dificuldades encontradas ao longo deste curso.

À minha mamãe Socorro, pela confiança e credibilidade em mim depositada, ao meu pai Domingos, por um dia ter sido quem ele foi, aos meus irmãos Eduardo e Tiago, pelo amor acima de tudo e à minha cunhada Huana, pela amizade de irmã caçula que ela passou a ser.

À minha amada companheira Vanessa pelo carinho, atenção e constante incentivo.

Aos meus amigos Kamacuaia, Patcheca, Lili, Daniel e Anderson por sempre estarem de bom humor e entenderem a minha ausência aos finais de semana.

Ao meu querido orientador José Gouvêa Luiz, pelos valiosos ensinamentos, extrema paciência e compreensão acima de tudo.

Ao Prof. Marcos Welby Correa Silva, pelo incentivo e amizade ao longo desde curso.

Aos Arqueólogos Denise Pahl Schaan e Paulo Roberto do Canto Lopes. A primeira por ter aceitado fazer parte desta banca examinadora e pelo apoio no campo em Santarém/PA; e o segundo pelas informações fornecidas e auxílio no levantamento em Belém/PA.

Ao Prof. Welitom Borges (UnB), pelo imensurável auxílio no processamento dos dados com o REFLEXW em 2D e 3D.

Ao técnico Paulo Magalhães pelas sábias e práticas instruções; e ao Márcio Amaral pela extrema ajuda em campo e pelas importantes informações e dados cedidos posteriormente.

Aos meus professores da Faculdade de Geofísica, pela competência e seriedade na docência.

Aos colegas de curso de pós-graduação em Geofísica, Hilton, Marcelo, Fabrício, Danilo e Hamilton, pelo companheirismo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado.

*“Não entendo. Isso é tão vasto que ultrapassa qualquer entender.
Entender é sempre limitado. Mas não entender pode não ter fronteiras.”*

Clarice Lispector (1920 – 1977)

RESUMO

O presente estudo foi realizado em duas áreas. A primeira, localizada nos fundos do Palacete Faciola em Belém/PA e, a segunda, denominada 4A, localizada no Sítio Arqueológico PA-ST-42, situado no Porto de Santarém/PA. O levantamento geofísico descrito neste trabalho foi realizado a fim de auxiliar a prospecção arqueológica, indicando locais para futuras escavações com objetivo de detectar estruturas e/ou artefatos enterrados nos sítios. Os radargramas adquiridos nas duas áreas mostraram diversas feições anômalas. Até a finalização deste trabalho nenhuma escavação havia sido realizada no Palacete Faciola. Na Área 4A, entretanto, duas trincheiras foram abertas revelando diversos fragmentos arqueológicos.

Palavras-chave: GPR. Arqueologia. Palacete Faciola. Sítio PA-ST-42. Escavações.

ABSTRACT

This study was conducted in two areas. The first, located at the backyard of the Palacete Faciola, Belém/PA and, the second, named 4A, in the Archaeological Site PA-ST-42, located at the Port of Santarém/PA. The geophysical survey described in this work was undertaken in order to assist in archaeological prospecting, indicating places for future excavations in order to detect structures and/or artifacts buried on the sites. The radargrams acquired in both areas showed several anomalous features. Until the finish of this work any excavation had been undertaken in Palacete Faciola. In 4A area, however, two trenches were opened revealing various archaeological fragments.

Key-words: GPR. Archaeology. Palacete Faciola. Site PA-ST-42. Excavations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ilustração de um trem de pulsos (adaptada de MAHAFZA, 2000).	16
Figura 2	Esquema de funcionamento de um GPR (adaptado de Davis; Annan, 1989).	17
Figura 3	Exemplificação de um levantamento GPR e ilustração de um radargrama (adaptada de Davis; Annan, 1989).	18
Figura 4	Mapa das áreas de estudo. A estrela representa o Palacete Faciola (Belém/PA) e o círculo, o Sítio Arqueológico PA-ST-42 Santarém/PA).	25
Figura 5	Fotografia aérea e mapa esquemático da localização do Palacete Faciola.	26
Figura 6	Foto do Palacete Faciola em 1930 e a monograma com as letras SF (Baleixe, 2011).	27
Figura 7	Fotos atuais do Palacete Faciola em reforma.	27
Figura 8	Fotografia aérea e mapa esquemático da localização da Área 4A.	28
Figura 9	Equipamento GSSI <i>SIR-3000</i> e antena de 400 MHz.	29
Figura 10	Grade do levantamento no Palacete Faciola.	30
Figura 11	Fotos da área do levantamento no Palacete Faciola.	31
Figura 12	Grade do levantamento na Área 4A.	32
Figura 13	Fotos da área do levantamento na área 4A.	33
Figura 14	Dado bruto (exemplo retirado dos dados coletados na área 4A – Santarém/PA).	34
Figura 15	Sequência de processamento utilizada nos dados de Belém e Santarém.	34
Figura 16	Dado após as etapas do pré-processamento.	35
Figura 17	Dado com aplicação do <i>Dewow</i> .	35
Figura 18	Dado com o ganho “ <i>Energy Decay</i> ”.	36
Figura 19	Dado com a Remoção do <i>Background</i> .	36
Figura 20	Dado com a aplicação do filtro Passa-banda <i>butterworth</i> .	37
Figura 21	Dado final do processamento, após o filtro <i>Runnig Average</i> .	37
Figura 22	Perfil 1 (T1) do Palacete Faciola revelando zona de acamamento simples.	39
Figura 23	Perfil 2 (T4) do Palacete Faciola revelando forte reflexão.	39
Figura 24	Perfil 3 (T5) do Palacete Faciola exibindo hipérbolos nas posições 7 m, 8 m e 9 m.	39
Figura 25	Perfil 4 (T6) do Palacete Faciola. Apresenta hipérbole nas proximidades da posição 6 m.	40
Figura 26	Perfil 5 (T7) do Palacete Faciola. Hipérbolos entre as marcações de 5 m e de 6 m.	40
Figura 27	Perfil 6 (T9) do Palacete Faciola. Revela hipérbolos entre as marcações de 3 m e de 7 m.	40
Figura 28	Perfil 7 (T10) do Palacete Faciola. Estrutura alongada e hipérbole.	41
Figura 29	Perfil 8 (T13) do Palacete Faciola. Hipérbolos em meio revolvido.	41
Figura 30	Perfil 9 (T15) do Palacete Faciola. Estruturas alongadas e inclinadas.	42
Figura 31	Perfil 10 (T21) do Palacete Faciola. Camada contínua e estrutura alongada.	42
Figura 32	Perfil 11 (L2) do Palacete Faciola. Hipérbolos e zona de atenuação do sinal.	42

Figura 33	Perfil 12 (L5) do Palacete Faciola. Hipérboles, estrutura inclinada e zona de atenuação.	43
Figura 34	Perfil 13 (L7) do Palacete Faciola. Hipérboles e estruturas alongadas.	43
Figura 35	Perfil 14 (L10) do Palacete Faciola. Hipérboles em solo revolvido e zonas de atenuação.	44
Figura 36	Perfil 15 (L11) do Palacete Faciola. Hipérboles, estruturas alongadas e inclinadas.	44
Figura 37	Cubo construído a partir dos perfis 2D (parte superior da figura) e <i>depth slice</i> a 0,5 m.	45
Figura 38	Localização das anomalias na área do Palacete Faciola.	46
Figura 39	Perfil 37 (A), Perfil 38 (B), Perfil 39 (C), Perfil 40 (D), Perfil 41 (E) e Perfil 42 (F) do Porto Cargill. Pequenas hipérboles e reflexões do tipo <i>hummocky</i> .	48
Figura 40	Perfil 80 do Porto Cargill. Grupo de pequenas hipérboles e reflexões do tipo <i>hummocky</i> .	49
Figura 41	Perfil 82 do Porto Cargill. Pequenas hipérboles e redução da estrutura <i>hummocky</i> .	49
Figura 42	Perfil 89 do Porto Cargill. Solo revolvido e ausência da estrutura <i>hummocky</i> .	49
Figura 43	Perfil 108 do Porto Cargill. Estrutura <i>hummocky</i> e hipérboles em formação inclinada.	50
Figura 44	Perfil 128 do Porto Cargill. Estruturas <i>hummocky</i> e camada ondulada.	50
Figura 45	Perfil 423 do Porto Cargill. Hipérboles e zona de forte reflexão do sinal.	51
Figura 46	Perfil 546 do Porto Cargill. Hipérboles e reverberação da energia.	51
Figura 47	Perfil 572 do Porto Cargill. Hipérboles ao logo do perfil.	51
Figura 48	Cubo construído a partir dos perfis 2D (parte superior da figura) e <i>depth slice</i> a 1 m.	52
Figura 49	Localização das áreas indicadas à escavação da Área 4A	53
Figura 50	Foto aérea mostrando as áreas de escavação no Porto Cargill.	54
Figura 51	Fotos das escavações realizadas na Área 4A do Porto Cargill (Foto: Marcio Amaral).	55
Figura 52	Fotos dos fragmentos encontrados nas escavações. (A) abrasador interno. (B) lâmina de machado. (C) pedaço de lâmina. (D) braço de estatueta. (E) face de estatueta de base semilunar. (F) orelha de estatueta com alargador. (G) vaso efígie. (H) flange vermelha com aplique em espiral. (I) flange zoomorfa (Foto: Marcio Amaral).	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	O MÉTODO GPR	14
2.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.2	CASOS HISTÓRICOS DE APLICAÇÕES À ARQUEOLOGIA	22
2.3	LEVANTAMENTO DE CAMPO	25
2.3.1	Apresentação das Áreas de Estudo	25
	- Palacete Faciola (Belém/PA)	26
	- Área 4A (Santarém/PA)	28
2.3.2	Coleta de Dados GPR	29
	- Levantamento no Palacete Faciola (Belém/PA)	30
	- Levantamento na área 4A (Santarém/PA)	32
2.4	PROCESSAMENTO DOS DADOS	34
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
3.1	PALACETE FACIOLA (BELÉM/PA)	38
3.2	ÁREA 4A (SANTARÉM/PA)	47
3.3	ESCAVAÇÕES	54
4	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

A Arqueologia visa estudar a história das civilizações desde sua origem, estas ainda existentes ou não, e contribuir para o melhor entendimento das sociedades humanas atuais, uma vez que traça um paralelo entre o passado e o presente a partir da análise do conjunto de artefatos/fragmentos semelhantes, de determinada época, representando, portanto, um povo com uma cultura definida e ocupante de um território demarcado. Com isto, a valorização e preservação de tais fragmentos são de grande importância (FUNARI, 2005).

Os estudos arqueológicos possuem diversas correntes teóricas e no contexto deste trabalho uma vertente arqueológica será abordada, a Arqueologia de Salvamento. A Arqueologia de Salvamento visa evitar a perda de patrimônio arqueológico devido à atividade humana ou natural e posterior liberação das áreas estudadas (prospectadas/escavadas) (BANDEIRA, 2001).

Devido ao tempo, ao crescimento das cidades em que os sítios arqueológicos estão situados e às condições de preservação que se encontram os fragmentos arqueológicos, estes são normalmente sensíveis, até mesmo à luz. Com o intuito de preservar tais peças é que as escavações (em caso de fragmentos no subsolo, que são a grande maioria) para a retirada desse material é extremamente criteriosa e delicada. Isso faz com que o tempo despendido para tais escavações seja usualmente grande, o que, por sua vez, pode acarretar trabalhos um tanto onerosos, devido à manutenção do pessoal envolvido.

As prospecções geofísicas com os Métodos Eletromagnéticos (EM), por serem não invasivas e não destrutivas, são bastante utilizadas na identificação de estruturas culturais em profundidade (e.g., antigas edificações, estatuetas, urnas funerárias, objetos utilizados como moedas de troca, dentre outros) e no mapeamento dos diferentes tipos de feições, bem como no imageamento da distribuição dos depósitos no subsolo.

Dentre os métodos EM, o método Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar* ou GPR) foi escolhido neste estudo, por permitir a execução de perfis contínuos e de alta resolução e facilidade na aquisição de dados, possibilitando sua aplicação inclusive em áreas urbanas.

O presente estudo foi realizado em duas áreas. A primeira, localizada nos fundos do Palacete Faciola, situado na Rua Dr. Moraes, esquina com Av. Nazaré em Belém/PA; e, a segunda área, localizada no Sítio Arqueológico PA-ST-42, situado no Porto de Santarém/PA ao lado da empresa Cargill e denominada de Área 4A. O levantamento geofísico descrito neste trabalho foi realizado a fim de auxiliar a prospecção arqueológica, indicando locais para futuras escavações com o objetivo de detectar estruturas e/ou artefatos enterrados nos sítios.

2 O MÉTODO GPR

O Radar (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging) de Penetração no Solo, também conhecido como radar de prospecção geotécnica (em Portugal), *earth sounding radar*, *georadar*, *ground probing radar*, *radar terrestre penetrant*, *subsurface radar*, *surface penetrating radar*, tem como principal e mais conhecida nomenclatura *ground penetrating radar* – GPR ou, simplesmente, radar.

O radar consiste de uma metodologia introduzida por Christian Hülsmeier (aos 22 anos de idade) baseada no uso de sinais eletromagnéticos para localização de objetos enterrados em subsuperfície, patenteada na Alemanha em 1904 (Patente nº 165546) e nos EUA em 1906 (Patente nº 810150). Somente em 1910 ocorreu a primeira publicação sobre a utilização dessa metodologia por Gotthelf Leimbach e Heinrich Löwy ao descrever uma pesquisa (Patente Alemã nº 237944) empregando sinais eletromagnéticos para detectar artefatos enterrados (BAUER 2005a; 2005b).

A primeira patente do uso do radar de pulsos para investigar estruturas soterradas foi obtida por Hülsenbeck em 1926 (Patente alemã nº 489434). Já Stern, no mesmo ano (1926), em um projeto criado e desenvolvido na Áustria, fez o primeiro equipamento de GPR aplicado com sucesso no mapeamento de geleiras (OLHOEFT, 1996).

Entre 1950 e 1960, as forças armadas dos EUA começaram a desenvolver sistemas de GPR para localizar túneis escavados e usados pelos Vietcongs. Durante a década de 1960, o sistema desenvolvido por Stern foi adaptado por cientistas americanos e usado na investigação das propriedades elétricas da subsuperfície lunar durante o Projeto Apolo 17 (BORGES, 2007; SIMMONS¹ *et al.* 1972 *apud* OLHOEFT, 1996).

Em meados de 1970, Rex Morey e Art Drake fundaram a *Geophysical Survey Systems Incorporated* (GSSI) e disponibilizaram de forma comercial o GPR, que antes era desenvolvido

¹ SIMMONS, G.; STRANGWAY, D. W.; BANNISTER, L.; BAKER, R.; CUBLEY, D.; LA TORRACA, G.; WATTS, R. The surface electrical properties experiment. *Lunar Geophysics*, p. 258-271. 1972.

pelos próprios usuários. A partir daí, outras empresas vão surgindo, como a *A-Cube Inc. Geological Survey* (DAVIS; ANNAN, 1989).

Ao longo da década de 1980, com o aumento da potência e sofisticação da digitalização do instrumento de GPR, o método se apresentou como uma ferramenta muito útil em estudos de engenharia civil, geologia, arqueologia, criminalística e aplicações em estudos ambientais, tais como contaminações por lixões e hidrocarbonetos, que tiveram maior divulgação de 1990 a 2000 (DANIELS, 2004).

Atualmente, o radar passa por um *boom* em Geofísica, mesmo sendo uma metodologia bastante antiga. Esse *boom* deve-se principalmente à evolução dos recursos de processamento (*softwares* e metodologias) oriundos da Sísmica. O GPR também conta com a vantagem de ser uma técnica não destrutiva e não invasiva, além de fornecer seções amigáveis à geologia e possuir um vasto leque de aplicações que podem variar de acordo com a frequência da antena utilizada.

Em suma, as principais aplicações do GPR são estudos de *permafrost* (gelo), mapeamento de feições geológicas, geotecnia (edificações civis, asfalto, tubulações, pistas de aterrissagem, pisos e calçadas), meio ambiente (lixões, aterros sanitários, curtumes, postos de serviços, refinarias, fábricas e cemitérios), geofísica legal (criminalística, forense, inspeções e material bélico), arqueologia (utensílios e edificações de povos antigos) e paleontologia (GALLI; SOUZA, 1999).

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O GPR é um método geofísico baseado na propagação de ondas EM de alta frequência. A partir de uma antena transmissora, são emitidas ondas de energia EM que podem variar de 10 MHz a 2,5 GHz. Quando a onda eletromagnética atinge uma interface entre materiais geológicos que apresentam propriedades EM distintas, parte da sua energia é refletida em direção à superfície, sendo captada pela mesma antena ou por uma segunda antena receptora (DAVIS; ANNAN, 1989) e parte é refratada.

Um sistema de GPR, basicamente, consiste de um gerador de sinal (caixa de controle), duas antenas, sendo uma de transmissão (Tx) e outra recepção (Rx), e um *datalogger*, que tem capacidade de gravação digital. Em alguns sistemas, uma única antena funciona tanto como receptor e transmissor (modo **monoestático**); quando se usam duas antenas separadas, sendo uma o transmissor e outra o receptor, o modo denomina-se **biestático** (BORGES, 2007).

Em geral, o radar emprega um trem de pulsos (Figura 1). O período interior do pulso (*PIP*) é T , o comprimento do pulso é τ e a diferença entre as posições do τ na transmissão e recepção dos pulsos é Δt . A antena de transmissão gera um trem de ondas na banda das radiofrequências que se propagam afastando-se num feixe cônico a uma velocidade no ar 300.000 km/s (0,3 m/ns) (MAHAFZA, 2000).

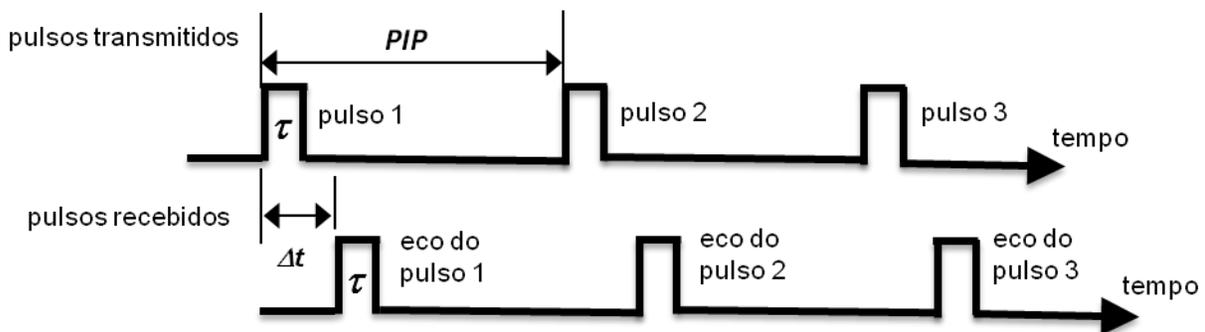


Figura 1 – Ilustração de um trem de pulsos (adaptada de MAHAFZA, 2000).

A propagação do sinal de radar em subsuperfície depende da frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas do meio. No caso dos materiais geológicos, as propriedades elétricas são controladas principalmente pela mineralogia dos constituintes, presença de argilas, conteúdo de minerais metálicos e pelo conteúdo de água. Havendo contraste em pelo menos uma das propriedades físicas (condutividade elétrica σ , constante dielétrica K e permeabilidade magnética μ) dos materiais em subsuperfície, parte do sinal é refletida, sendo recebida pela antena receptora.

Na unidade de controle os sinais recebidos são amplificados e processados, e podem ser visualizados durante a coleta dos dados. O posicionamento de uma interface de reflexão é computado medindo o tempo de trânsito da onda, que é o tempo que um pulso leva para percorrer o trajeto entre a antena transmissora, a interface e a antena receptora (Figura 2).

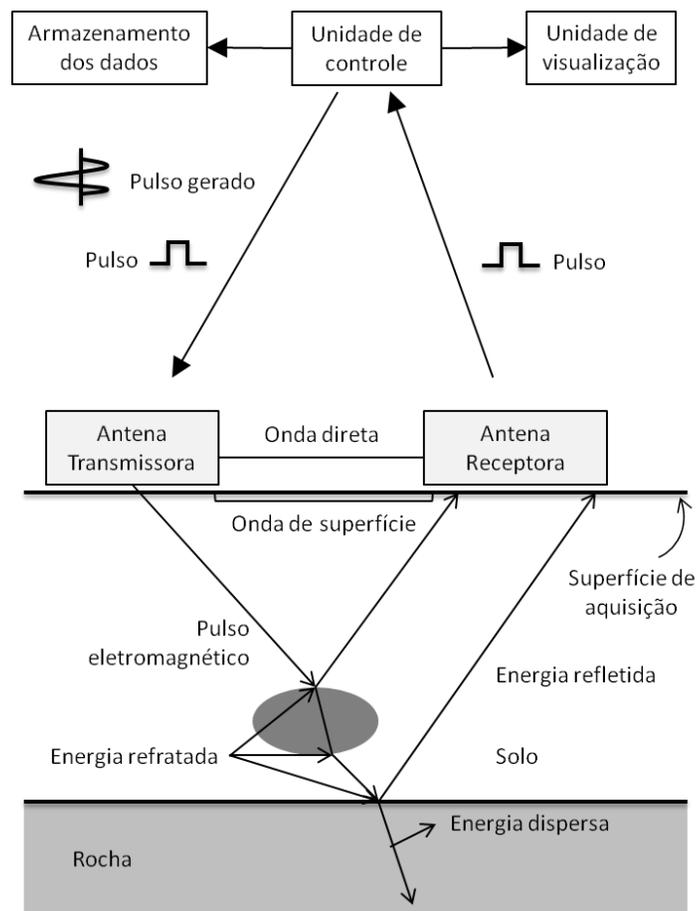


Figura 2 – Esquema de funcionamento de um GPR (adaptado de Davis; Annan, 1989).

A seção resultante de um perfil executado com o GPR, o radargrama, é formada por cada traço (*scan*) representativo dos tempos de chegada dos pulsos refletidos, bem como o pulso transmitido pelo ar mais a onda direta que se propaga pelo solo. Conforme é deslocada a antena sobre o terreno, são registrados diferentes *scans* em diferentes pontos. O conjunto de *scans* posicionados lado a lado (Figura 3), na sequência de suas aquisições, forma o radargrama, que é uma exibição análoga à seção sísmica (sismograma) (DAVIS; ANNAN, 1989).

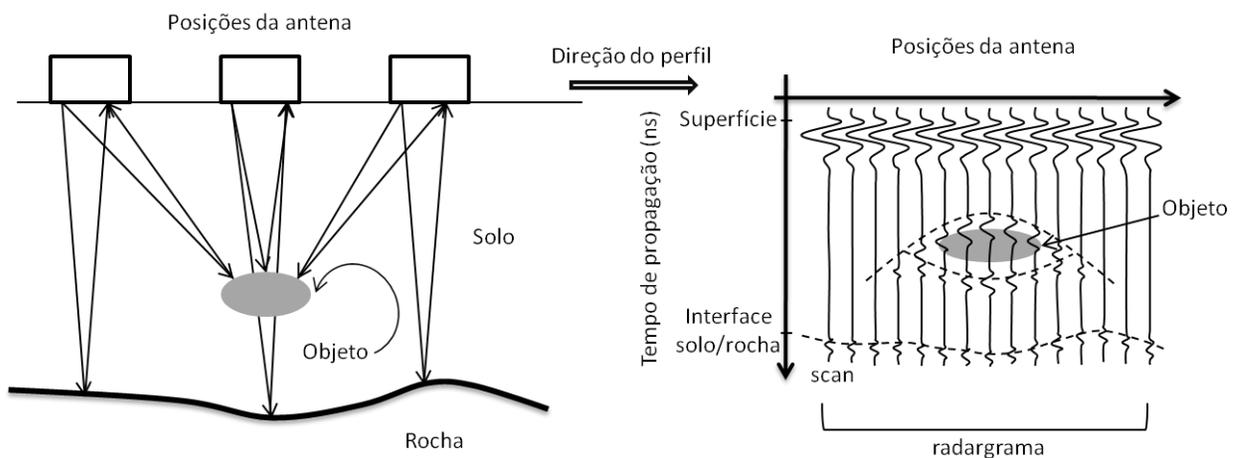


Figura 3 – Exemplificação de um levantamento GPR e ilustração de um radargrama (adaptada de Davis; Annan, 1989).

A partir do radargrama se pode obter a profundidade das interfaces de reflexão facilitando assim a interpretação do perfil e fornecendo uma aproximada localização dos alvos. Para isso é necessário conhecer, essencialmente, dois parâmetros: o tempo de trânsito entre o início da propagação e a chegada da onda refletida; e a velocidade de propagação da onda.

O tempo de trânsito é armazenado no *datalogger* durante a aquisição dos dados, enquanto a velocidade de propagação é basicamente controlada pela constante dielétrica dos materiais em subsuperfície, que é a razão entre a permissividade elétrica do material e a do vácuo, cujo valor é $8,854 \times 10^{-12}$ F/m. Em um meio não magnético, a velocidade de propagação pode ser estimada por meio da expressão

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}}, \quad (1)$$

sendo c a velocidade da propagação da onda EM no vácuo (3×10^8 m/s = 0,3 m/s). Valores de condutividade elétrica e velocidade da onda EM em alguns materiais são listados na Tabela 1.

MATERIAL	σ (mS/m)	V (m/ns)
Água doce	0	0,30
Água salgada	0,5	0,033
Areia saturada	0,01	0,15
Argila	0,01–1	0,06
Asfalto	0	0,1–0,12
Concreto seco	0	0,13
Concreto saturado	0	0,08
Ferro	10^9	0,3
PVC	0	0,1–0,17
Siltito saturado	100	0,05
Solo arenoso seco	0,14	0,18
Solo arenoso saturado	6,9	0,06
Solo argiloso seco	0,27	0,19
Solo argiloso saturado	1–10	0,09

Tabela 1 – Valores de condutividades e velocidades (adaptada de DAVIS; ANNAN, 1989).

A profundidade de penetração da onda, por sua vez, é controlada pela sua frequência e pela resistividade elétrica do meio onde ela se propaga. A frequência é diretamente proporcional à resolução e inversamente proporcional à penetração da onda no meio. Para uma determinada velocidade V , à medida que a frequência f aumenta, o comprimento de onda λ diminui, ou seja, pode-se escrever:

$$V = \lambda f. \quad (2)$$

A equação da onda eletromagnética para o campo elétrico \vec{E} é dada por

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \frac{\partial(\sigma \vec{E})}{\partial t} + \mu \frac{\partial^2(\epsilon \vec{E})}{\partial t^2}, \quad (3)$$

sendo ∇^2 o operador Laplaciano, μ a permeabilidade magnética, σ a condutividade elétrica (inverso da resistividade), ϵ a permissividade elétrica e t o tempo.

A solução geral para a equação da onda é representada por

$$E = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (4)$$

em que E_0 é a amplitude máxima da onda, z a profundidade e α e β são parâmetros que contêm as propriedades EM do meio (resistividade elétrica, permissividade elétrica e permeabilidade magnética). A primeira exponencial controla a atenuação da onda, enquanto a segunda, a sua propagação.

Durante a propagação da onda eletromagnética, sua energia é refletida e refratada quando encontra variações nas propriedades eletromagnéticas do meio. Essas propriedades são normalmente acopladas em um parâmetro denominado de impedância intrínseca, definido por

$$Z = \frac{\sqrt{i \omega \mu}}{\sqrt{\sigma + i \omega \epsilon}}. \quad (5)$$

O contraste entre as propriedades eletromagnéticas ou o contraste entre as impedâncias intrínsecas dos meios controla a quantidade de energia refletida. Essa quantidade pode ser avaliada através do coeficiente de reflexão definido por

$$CR = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (6)$$

em que os índices 1 e 2 referem-se aos meios 1 e 2 separados por uma interface.

A impedância intrínseca Z é aproximada por $\sqrt{\mu/\epsilon}$, quando a condutividade (σ) for pequena (menor que 10^{-3}). Nesse caso, o coeficiente de reflexão pode ser estimado por

$$CR = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}. \quad (7)$$

Teoricamente, a resolução pode ser estimada tomando-se 1/4 do comprimento de onda. Desse modo, para uma onda de 100 MHz e 0,08 m/ns de velocidade, é possível reconhecer corpos de dimensões superiores a 0,2 m; enquanto que para uma onda de 400 Mhz e mesma velocidade, é possível identificar corpos de dimensões superiores a 0,05 m (AL-QUADI; LAHOUAR, 2005; CLARK *et al.* 2001; DAVIS; ANNAN, 1989).

2.1 CASOS HISTÓRICOS DE APLICAÇÃO À ARQUEOLOGIA

A presente compilação mostra a evolução do uso do GPR aplicado à Arqueologia no Brasil, principalmente região amazônica, ao longo dos anos. As referências utilizadas na composição deste capítulo são compostas por resumos expandidos em anais de eventos, artigos indexados em periódicos e dissertações de mestrado que abordaram a temática supracitada.

Barradas *et al.* (1999) aplicaram GPR e magnetometria no sítio arqueológico de Cacoal, localizado em Anajás, Ilha do Marajó/Pará. A correlação dos dados levantados mostrou a distribuição das anomalias, bem como a profundidade e tamanho de suas fontes. Três pequenas áreas foram escavadas nos locais indicados pela geofísica e foram encontrados grandes quantidades de carvão vegetal e fragmentos de cerâmica. Amostras desses fragmentos foram coletadas para serem analisados pelo Museu Paraense Emílio Goeldi e UFPA.

Cezar *et al.* (2001) realizaram sondagens com o GPR no sítio Morro Grande e Serrano, ambos localizados em Araruama/Rio de Janeiro. O conjunto das anomalias de GPR revelou várias zonas anômalas que após escavadas mostraram a presença de urnas, tampas e tigelas pintadas no sítio de Morro Grande. As escavações nos pontos apontados pelas anomalias GPR, no sítio Serrano, permitiram a localização de fragmentos cerâmicos dispersos pelo sítio. Estes artefatos necessitavam ser recuperados antes que fossem completamente destruídos pela exploração predatória de areias no local do estudo.

Brito-Schimmel *et al.* (2002) aplicaram GPR e magnetometria no sítio Capelinha, localizado em Cajati/São Paulo. Com o levantamento magnético detectou-se a presença de uma paleofogueira devido a sua magnetização remanescente, confirmada por uma escavação, que encontrou associado a essa fogueira artefatos confeccionados com dentes de animais, pontas de flechas e fragmentos de cerâmica. O GPR mostrou uma zona que evidencia uma estrutura de escavação/preenchimento que é caracterizada pela ausência de refletores em uma zona com um grande acúmulo de conchas. Ao final das investigações geofísicas o sítio foi delimitado e os alvos mais promissores a escavação foram identificados.

Castro *et al.* (2004) utilizaram o GPR em áreas no entorno da Casa de Dom Aquino, Cuiabá/Mato Grosso. A prospecção geofísica com o GPR permitiu identificarem locais com maiores concentrações de artefatos. O trabalho de escavação arqueológica encontrou diversos fragmentos de cerâmicas, louças, vidros, telhas nos locais das anomalias de GPR. Foram identificados também dois substratos pedogenéticos, um natural e outro antrópico, confirmados pelas escavações.

Luiz & Pereira (2005) desenvolveram um estudo com os métodos magnético, eletrorresistivo e GPR no sítio Domingos, localizado em Canaã dos Carajás/Pará. A correlação das medidas magnéticas e eletrorresistivas revelaram anomalias compatíveis com a camada de ocupação. Os radargramas mostraram hipérboles e ondulações normalmente provocadas por potes cerâmicos e interrupções nos registros, que aparecem como descontinuidades laterais devido a interrupções no acamamento normal dos sedimentos do subsolo, caracterizando enterramentos. Nas escavações feitas posteriormente foram encontrados muitos fragmentos cerâmicos, vasilhames inteiros e algumas lâminas de machado polido nas áreas anômalas.

Aragão (2006) utilizou as metodologias GPR, cintilometria e magnetometria nos sítios arqueológicos Bittencourt, sítio Jambuaçu e sítio Jaburu do Rio Paru, respectivamente localizados em Abaetetuba, Moju e Almeirim, todos municípios do estado do Pará. Os registros do GPR mostraram feições anômalas do tipo hipérboles, descontinuidades laterais e ondulações. As anomalias geofísicas foram demarcadas em unidades amostrais de escavação formando os padrões de distribuição espacial de estruturas e feições. Nas escavações, um horizonte de cor mais escura, com restos de artefatos cerâmicos e líticos, foi encontrado.

Melo (2007) realizou um estudo com o GPR e magnetometria na área do antigo Engenho Murutucu, localizado em Belém/Pará. As anomalias magnéticas revelam um tipo de estrutura do Engenho, podendo ser um muro, cerca ou até mesmo resquícios de alguma construção antiga na área de estudo, além de pequenas anomalias características de pequenos objetos cerâmicos. O GPR mostrou pequenas hipérboles caracterizando a presença de resíduos de ocupação humana, como cerâmica e materiais de construção. Os locais indicados com a geofísica servirão de guia para futuras intervenções arqueológicas no sítio.

Oliveira *et al.* (2008) aplicaram o GPR de modo 3D (levantamento 2D interpolado para se obter um cubo) na área das ruínas do Convento de Boa Ventura, localizado no distrito de Porto das Caixas, em Itaboraí/Rio de Janeiro. Os perfis obtidos com o GPR apresentaram anomalias com formatos retangulares e foram relacionadas a edificações (paredes de blocos de rochas) em diversas localidades subterrâneas aos arredores do convento. Os resultados possibilitaram o direcionamento das escavações arqueológicas na área.

Souza *et al.* (2010) desenvolveram um estudo com a aplicação de GPR (3D) no Mosteiro e Museu de São Bento, localizado na cidade de São Paulo/São Paulo. Os levantamentos com o GPR foram realizados no chão da sala e em uma das paredes. Os locais alvos das investigações foram apontados pelos arqueólogos, baseados na análise de documentos históricos. Nas áreas em que o GPR identificou anomalias geofísicas, escavações comprovaram a presença de vestígios arqueológicos relacionados a sepultamentos.

Os estudos aqui descritos mostram diversas aplicações do GPR na Arqueologia. Deve ser ressaltado que, como em qualquer outro método geofísico, as medidas são indiretas e a resposta pode ser ambígua, i.e., vários fatores podem ser as fontes das anomalias nos perfis, ocasionando feições muito semelhantes entre si. Todavia, a ambiguidade pode ser minimizada com informações *a priori* sobre as zonas estudadas, que normalmente são fornecidas pelo arqueólogo. Luiz (2009) diz que os arqueólogos e geofísicos devem interagir, discutindo as anomalias evidenciadas nos levantamentos, para decidir os melhores locais para a escavação.

2.3 LEVANTAMENTO DE CAMPO

2.3.1 Apresentação das Áreas de Estudo

O presente estudo foi realizado em duas áreas (Figura 4). A primeira, localizada nos fundos do Palacete Faciola, situado no município de Belém/PA e a segunda área, denominada de 4A, localizada no Sítio Arqueológico PA-ST-42, situado no município de Santarém/PA.

Apresentar-se-á aqui a localização, um breve histórico e as condições atuais das áreas estudadas.

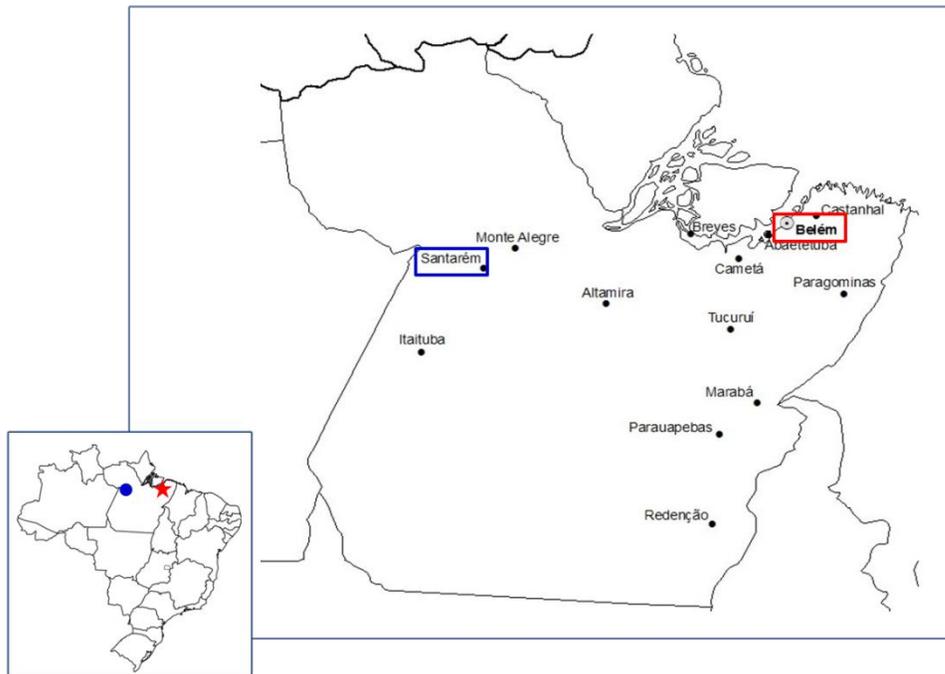


Figura 4 – Mapa das áreas de estudo. A estrela representa o Palacete Faciola (Belém/PA) e o círculo, o Sítio Arqueológico PA-ST-42 (Santarém/PA).



Figura 6 – Foto do Palacete Faciola em 1930 e a monograma com as letras SF (Baleixe, 2011).

O Palacete (Figura 7), em ruínas, encontra-se hoje sendo restaurado pelo governo do Estado e será sede do Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará (IDESP).

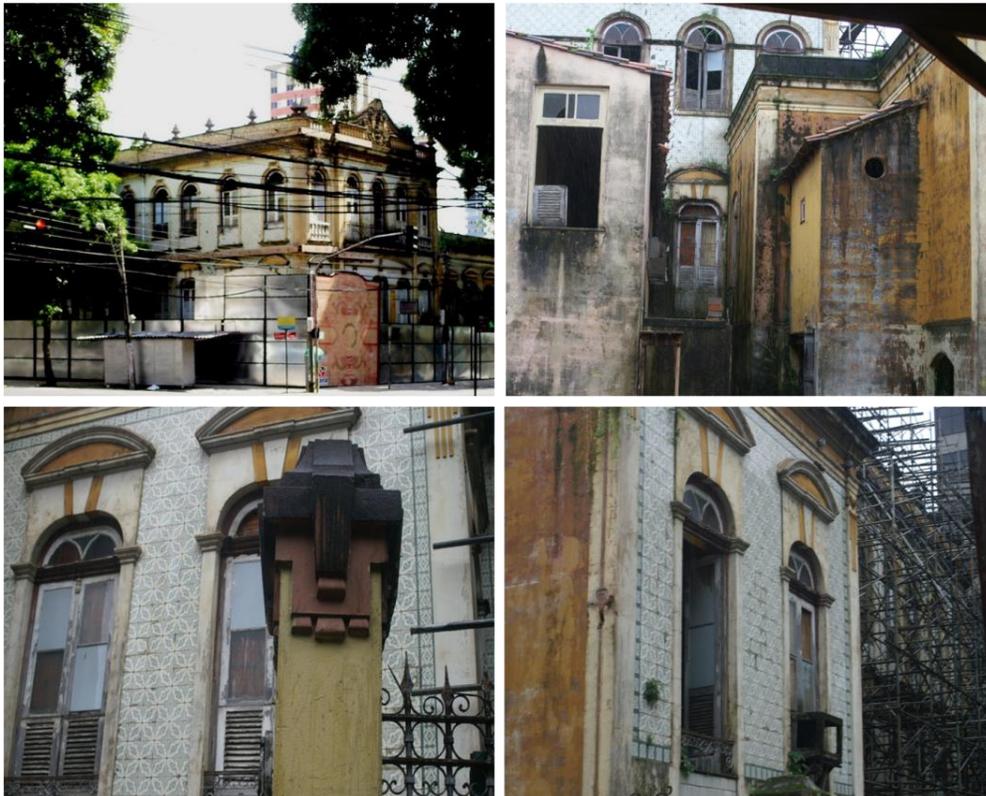


Figura 7 – Fotos atuais do Palacete Faciola em reforma.

Segundo o arqueólogo Paulo Roberto do Canto Lopes, responsável pela área e estudos de documentos realizados pelo Museu Histórico do Estado do Pará, os fundos do Palacete eram destinados a sepultamentos de entes da Família Faciola.

– Área 4A (Santarém/PA)

Área 4A, situada no Sítio Arqueológico PA-ST-42, mais precisamente no Porto de Santarém ao lado da empresa Cargill Agrícola S.A., localizada na Av. Cuiabá (BR 163) esquina com a Rua da Juventude, no município de Santarém/PA (Figura 8).

A região em que o Sítio PA-ST-42 está situado era habitada pelos índios Tapajós que dominavam terras que se estendiam pela orla do Rio Tapajós até o Planalto de Belterra (município paraense localizado a aproximadamente 44 km de Santarém)

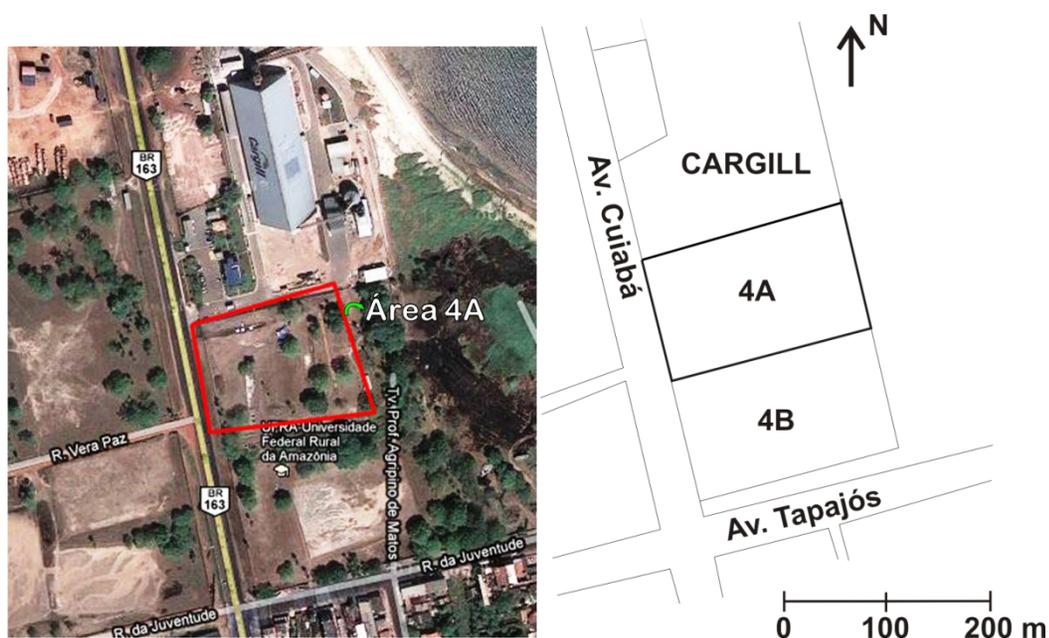


Figura 8 – Fotografia aérea e mapa esquemático da localização da Área 4A.

De acordo com os arqueólogos envolvidos nesse trabalho, os Tapajós foram dizimados, devido a escravidão e/ou proliferação de doenças trazidas pelos europeus. Por essa razão pouco se sabe sobre o modo de vida desse povo. Entretanto, durante o desenvolvimento de Santarém, com a construção de edificações acarretaram revolvimento do solo, expondo fragmentos cerâmicos de formas variadas, com decorações elaboradas na forma de animais e figuras humanas e algumas pedras verdes (utilizadas como moeda de troca), vestígios dos extintos Tapajós.

Atualmente, o Sítio Arqueológico em que a área 4A está contida encontra-se em processo de salvamento arqueológico para posterior liberação às atividades portuárias da CDP (Companhia de Docas do Pará) e da empresa Cargill Agrícola S.A. (terminal de embarque de soja).

2.3.2 Coleta dos Dados de GPR

Para a realização dos levantamentos se utilizou o equipamento TerraSIRch SIR (*Subsurface Interface Radar*) System-3000 da GSSI (*Geophysical Survey Systems, Inc.*) e uma antena biestática blindada de 400 MHz (Modelo 5103).



Figura 9 – Equipamento GSSI SIR-3000 e antena de 400 MHz.

O equipamento foi ajustado para uma janela de tempo de amostragem de 50 ns, 512 amostras por *scan*, 64 *scans* por segundo, taxa de transmissão de 100 KHz e resolução de 16 bits (dados no formato *.dzt).

As medidas nas áreas estudadas foram realizadas ao longo de perfis no modo tempo com as antenas na configuração separação constante (*commom offset*). O controle da distância e posicionamento das medidas foi feito a partir da inserção de marcas no registro a intervalos 1 m a 5 m controladas por trena.

– Levantamento no Palacete Faciola

O levantamento foi desenvolvido com o objetivo de localizar feições associadas a enterramentos realizados nos fundos do Palacete Faciola. A aquisição ocorreu em duas campanhas: a primeira em 30/04/2009, em que se obteve 25 perfis transversais e 5 perfis longitudinais. A segunda campanha, no dia 02/05/2009, em que se retomou o levantamento dos perfis longitudinais, resultando na realização de mais 8 perfis.

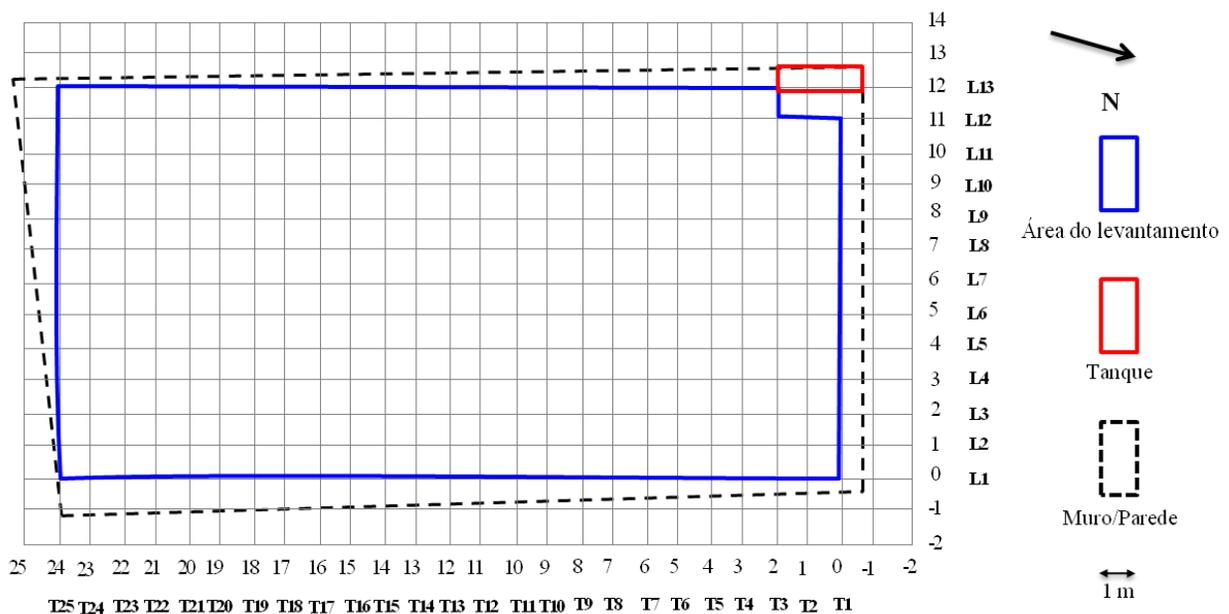


Figura 10 – Grade do levantamento no Palacete Faciola.

Os perfis de medida foram dispostos de modo a formar uma grade quadrada de 1 m de lado (Figura 10). Os perfis paralelos ao maior comprimento da área investigada foram denominados de longitudinais (aproximadamente N-S) e são identificados pela inicial L, enquanto os perfis perpendiculares aos longitudinais foram denominados de transversais e identificados pela letra T.

As marcações no registro foram feitas a cada 1 m nos perfis transversais e a cada 2 m nos perfis longitudinais. O comprimento dos perfis foi de 11 m, nos 4 primeiros perfis transversais, devido a presença de uma estrutura similar a um tanque; de 12 m nos demais perfis transversais e de 24 m nos perfis longitudinais com exceção do último perfil (L13) que foi de 22 m, por conta da estrutura do tanque anteriormente citada.

A superfície em que o levantamento foi realizado se encontrava cimentada e possuía algumas zonas com grama que se formou no meio do concreto deteriorado. Circundando a área havia a presença de muros e uma parede em uma das partes laterais.



Figura 11 – Fotos da área do levantamento no Palacete Faciola.

– Levantamento na Área 4A

O levantamento foi realizado com o objetivo de localizar feições associadas a fragmentos cerâmicos relacionados a sepultamentos, rituais ou adorno dos povos Tapajós, utilizando o método GPR na Área 4A, pertencente ao Sítio PA-ST-42 e ocorreu em uma campanha realizada do dia 05/08/2009 ao dia 13/08/2009, em que se adquiriu 413 perfis na área principal do levantamento e 160 perfis em um campo de futebol contido na área.

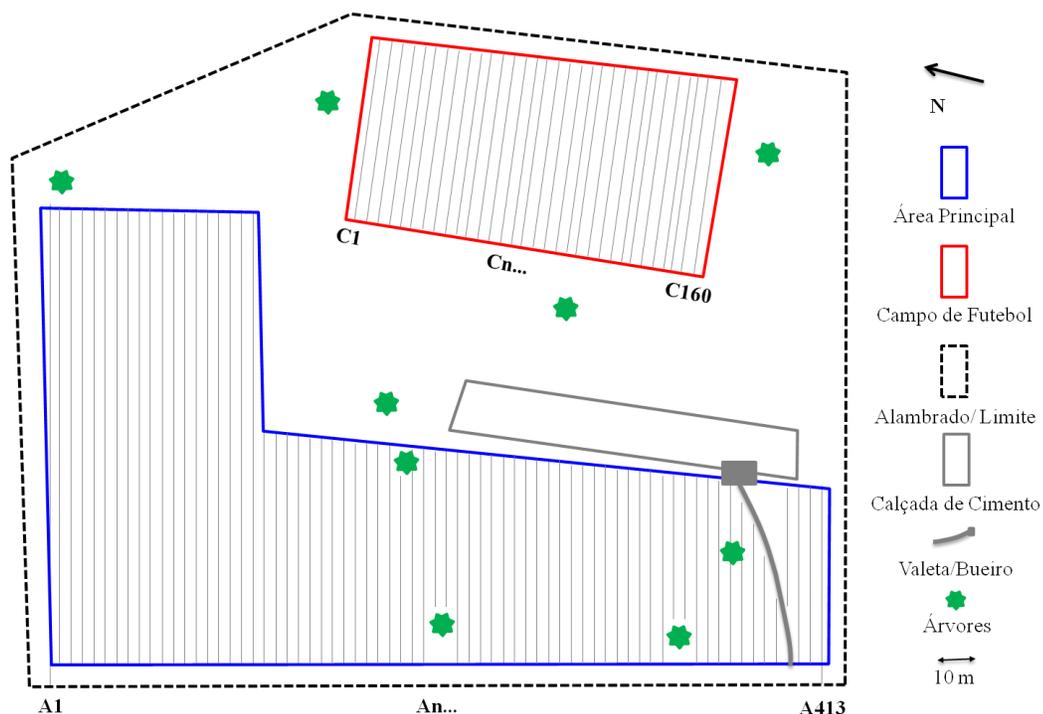


Figura 12 – Grade do levantamento na Área 4A.

Os perfis de medida foram dispostos de modo transversal às estruturas litológicas (observadas através de um corte de estrada) presentes na área. Na área principal, os perfis são identificados pela inicial A, enquanto os perfis realizados no campo de futebol são identificados pela letra C (Figura 12).

As marcações no registro foram feitas a cada 5 m e o espaçamento entre os perfis foi de 0,25 m. O comprimento dos perfis variou de 15 m a 59 m na área principal, devido à presença de árvores, irregularidades do terreno e uma valeta de coleta e drenagem de águas pluviais (valeta e bueiro). No campo de futebol o comprimento dos perfis variou de 16 m a 33 m, devido aos limites do campo serem irregulares. A figura 13 ilustra aspectos da preparação dos perfis e das medidas na área principal.

A superfície em que o levantamento foi realizado se encontrava completamente gramada, possuía algumas árvores, morrotes de solo e uma zona cimentada. Circundando a área havia a presença de alambrados e um pequeno muro na entrada.



Figura 13 – Fotos da área do levantamento na área 4A.

2.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados brutos obtidos em campo com o GPR (Figura 14) foram processados com o *software* REFLEXW versão 5.0.5, licenciado à Faculdade de Geofísica/Instituto de Geociências da UFPA, com a finalidade de melhorar a visualização e a interpretação dos registros.

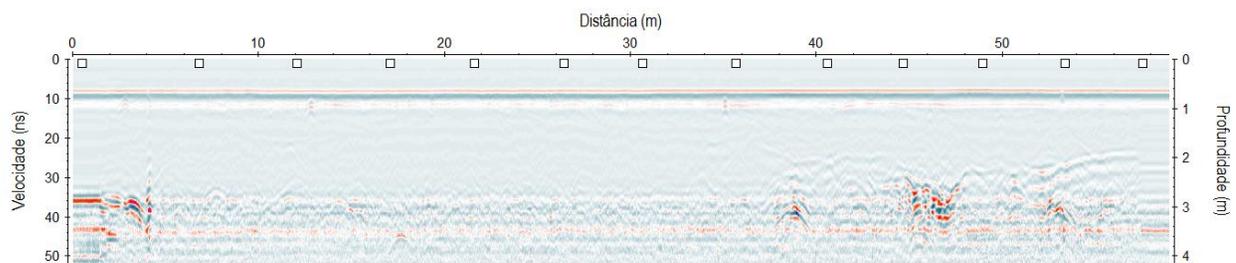


Figura 14 – Dado bruto (exemplo retirado dos dados coletados na área 4A – Santarém/PA).

Nos perfis do presente estudo, i.e., tanto nos dados de Belém quanto nos dados de Santarém, utilizou-se a sequência de processamento ilustrada no fluxograma apresentado na Figura 15.



Figura 15 – Sequência de processamento utilizada nos dados de Belém e Santarém.

Primeiramente se iniciou o tratamento dos dados com o pré-processamento, que consistiu da Edição de Traços; Reamostragem Espacial e Interpolação de Traços (Figura 16). A **Edição de Traços** permite a correção do tempo em que as antenas ficam ligadas paradas (varredura em um mesmo ponto) e opera com os parâmetros fornecidos pelo usuário. Tais parâmetros são os números dos traços de início e término do perfil desconsiderando-se as zonas de investigação no mesmo ponto.

Após a Edição de Traços é necessário colocar os dados nos seus tamanhos reais e fazer a **Reamostragem Espacial**, para que os mesmos os traços fiquem com seus tamanhos e distribuições de informações em parâmetros reais. A **Interpolação de Traços** normaliza a escala horizontal do perfil coletado no modo tempo (SANDMEIER, 1998; YELF, 2004).

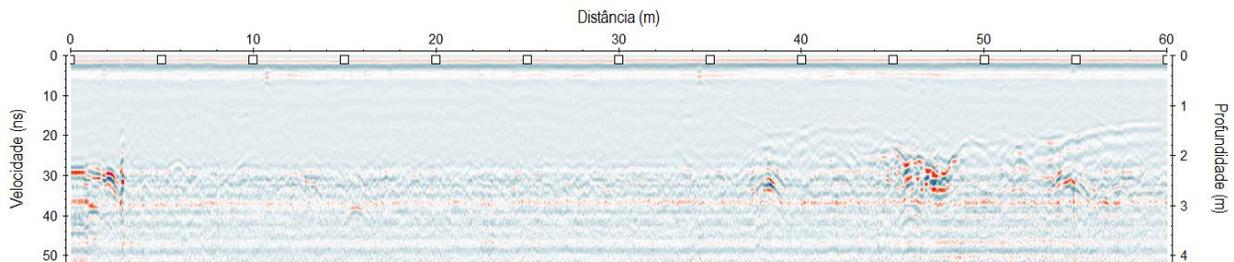


Figura 16 – Dado após as etapas do pré-processamento.

Como primeira etapa do processamento, utilizou-se o *Dewow* (*subtract-mean*), que pode eliminar uma boa parte das baixas frequências associadas à saturação do sistema de registro, devido às grandes amplitudes das ondas diretas no ar e no solo (Figura 17). Para este propósito, o intervalo da janela deve ser ajustado para aproximadamente o tamanho do pulso principal (*wavelet*) através da onda direta, que pode ser visualizada em *wiggle window* (MESSINGER, 2004; STRANNEBY, 2001).

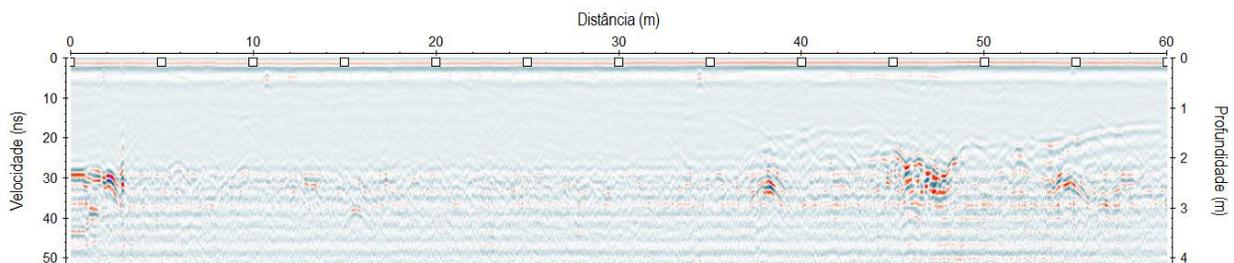


Figura 17 – Dado com aplicação do *Dewow*.

O **Ganho** utilizado foi o “Decaimento de Energia”. Este maximiza gradativamente os contrastes, fornecendo uma imagem mais nítida das mudanças de propriedades físicas da subsuperfície, porém ele também maximiza ruídos de baixa frequência (Figura 18).

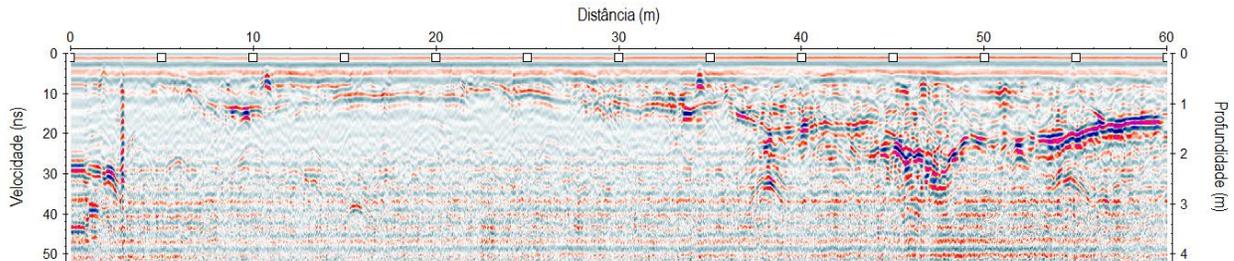


Figura 18 – Dado com o ganho “Energy Decay”.

Para a eliminação dos refletores horizontais que são muito comuns nos dados de GPR utilizou-se o filtro **Remoção do Background** (Figura 19), que ao eliminar estes refletores torna mais visíveis alguns refletores inclinados e outros pontuais, antes mascarados por esses ruídos (ANNAN, 1993).

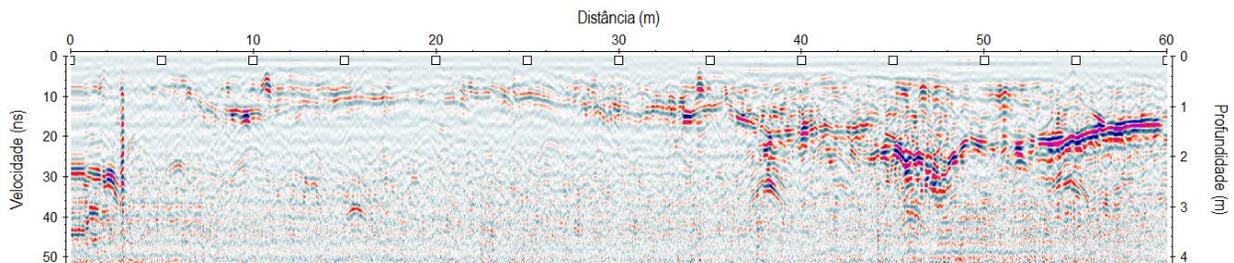


Figura 19 – Dado com a Remoção do Background.

Para retirada do ruído de baixa frequência dos dados, utilizou-se um filtro **Passa-Banda Butterworth** (Figura 20). Como a antena utilizada foi de 400 MHz (frequência central), a concentração maior de energia no espectro se encontra entre a metade e, no máximo, no dobro desse valor, uma vez que a terra se comporta como um filtro, dispersando a energia. O filtro foi desenhado usando as frequências 200 MHz e 600 MHz e tem a forma quadrada. Os valores empregados no filtro foram obtidos após vários testes, a fim de minimizar o efeito de um janelamento inadequado, ocasionando em perdas de informações importantes (BRANDWOOD, 2003).

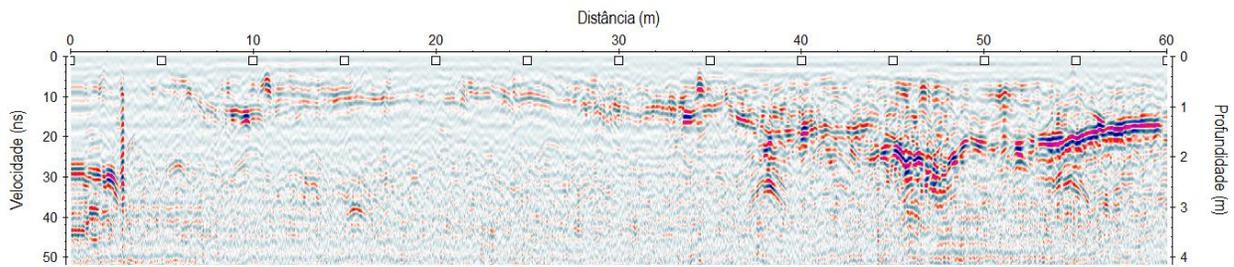


Figura 20 – Dado com a aplicação do filtro Passa-banda *butterworth*.

Finalizando o processamento dos dados, utilizou-se o filtro *Running Average*, com o propósito de suavizar ruídos sobre os refletores e melhorar a visualização da continuidade dos eventos (Figura 21). Observando que o aumento do número de traços utilizados na média do filtro faz com que, algumas vezes, haja demasiada suavização dos refletores (ANNAN, 1993).

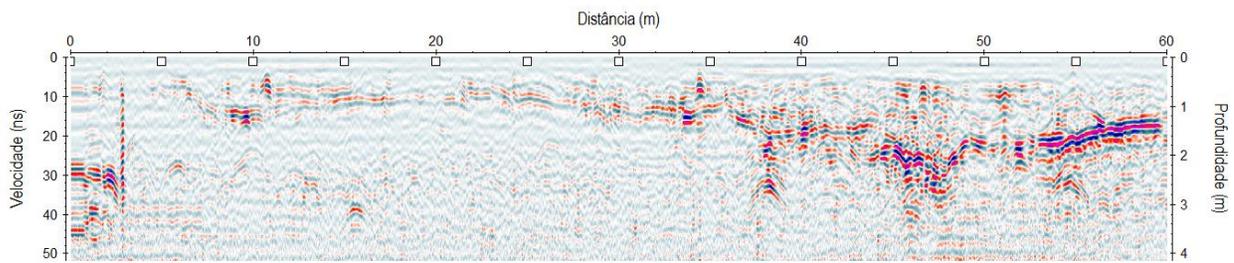


Figura 21 – Dado final do processamento, após o filtro *Runnig Average*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo exibiremos os radargramas, processados e interpretados, que foram coletados durante os levantamentos realizados nas áreas do Palacete Faciola (Belém/PA) e no sítio arqueológico denominado de Área 4A (Santarém/PA) localizado na zona portuária da empresa Cargill Agrícola S.A.

Como o montante dos dados coletados em ambas as áreas resultou em 611 perfis, em que 38 perfis são do Palacete Faciola e 573 perfis são da Área 4A, somente alguns perfis serão aqui apresentados, sendo estes os que resumem os eventos observados nos demais perfis.

A partir dos resultados adquiridos com os dados interpretados algumas zonas foram apontadas como tendo o maior potencial à presença de artefatos enterrados. Com base nessas zonas, na prioridade de resgate dos fragmentos e liberação das áreas realizou-se uma escavação na Área 4A, em que os resultados serão apresentados aqui. Na área do Palacete Faciola a escavação das zonas indicadas até o presente momento ainda não foi realizada.

3.1 PALACETE FACIOLA (BELÉM/PA)

Conforme descrito no capítulo Levantamento de Campo, os perfis adquiridos no Palacete Faciola foram levantados de forma longitudinal (paralelos à maior extensão da área e com comprimentos de 22 m e 24 m) e transversal (comprimentos de 11 m e 12 m), cobrindo toda a área dos fundos do palacete.

O perfil 1 (Figura 22), situado na posição T1 (Figura 10,) é transversal ao maior comprimento da área do levantamento e possui 11 m de extensão. O radargrama revela reflexões características de um acamamento simples dos sedimentos em subsuperfície e em forma de ondas. Feição comum ao tipo de ambiente estudado.

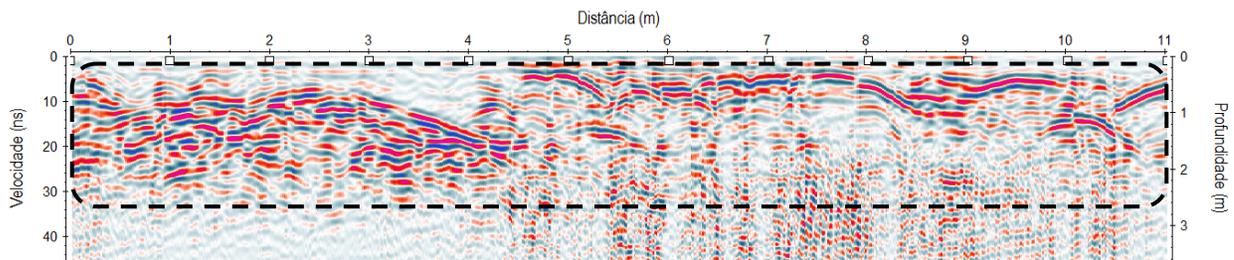


Figura 22 – Perfil 1 (T1) do Palacete Faciola revelando zona de acamamento simples.

No perfil 2 (Figura 23), localizado na posição T4 (Figura 10), que é transversal ao maior comprimento da área do levantamento e possui 12 m de extensão, é possível observar a presença de uma forte reflexão caracterizada pela presença de uma hipérbole na posição da marcação de 8 m (centro da hipérbole). A reflexão em destaque pode ser indício de estrutura metálica associada aos enterramentos.

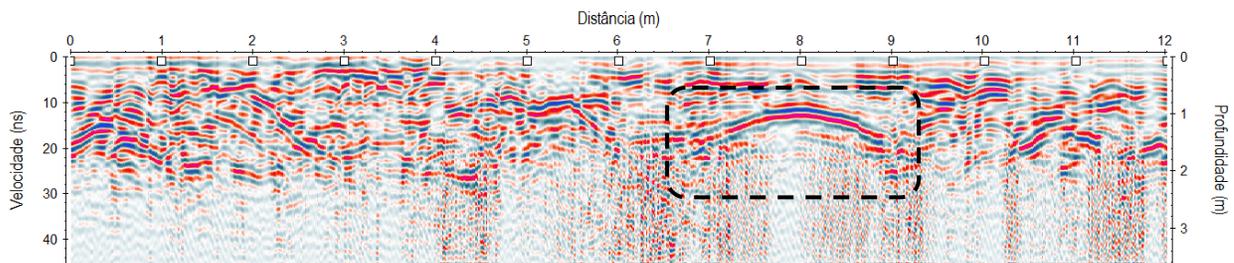


Figura 23 – Perfil 2 (T4) do Palacete Faciola revelando forte reflexão.

O perfil 3 (Figura 24), representado por T5 (Figura 10) e possuindo 12 m de extensão, apresenta três hipérboles nas posições das marcas de 7 m, 8 m e 9 m, aproximadamente.

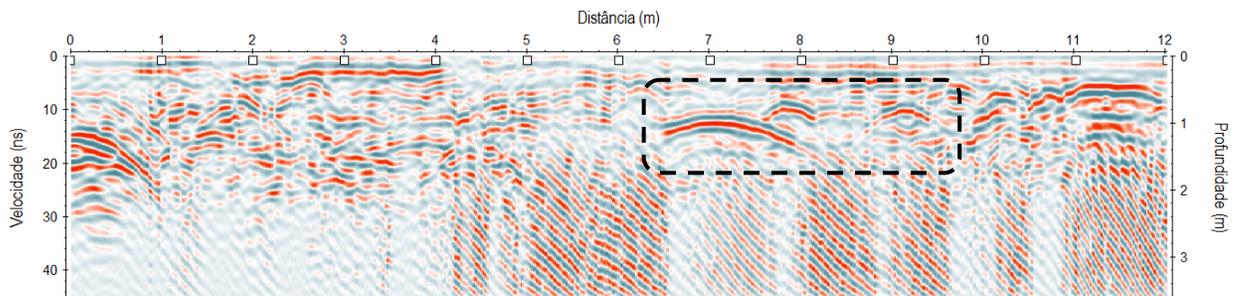


Figura 24 – Perfil 3 (T5) do Palacete Faciola exibindo hipérboles nas posições 7 m, 8 m e 9 m.

Pode-se observar no perfil 4 (Figura 25) a presença de uma pequena hipérbole com centro próximo a posição da marcação de 6 m. A hipérbole se destaca bem em meio ao solo com acamamento ondular, “quebrando” a continuidade dos refletores.

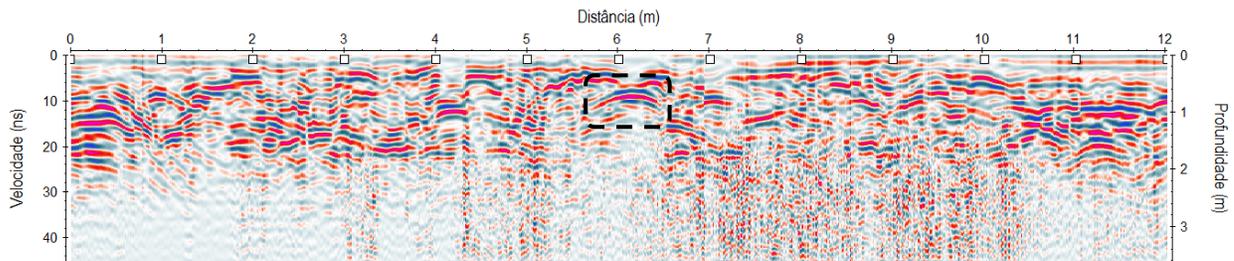


Figura 25 – Perfil 4 (T6) do Palacete Faciola. Apresenta hipérbole nas proximidades da posição 6 m.

Na Figura 26 (Perfil 5 – T7) é visível a presença de reflexões bem rasas, caracterizadas por três hipérboles entre as marcações das posições 5 m e 6 m.

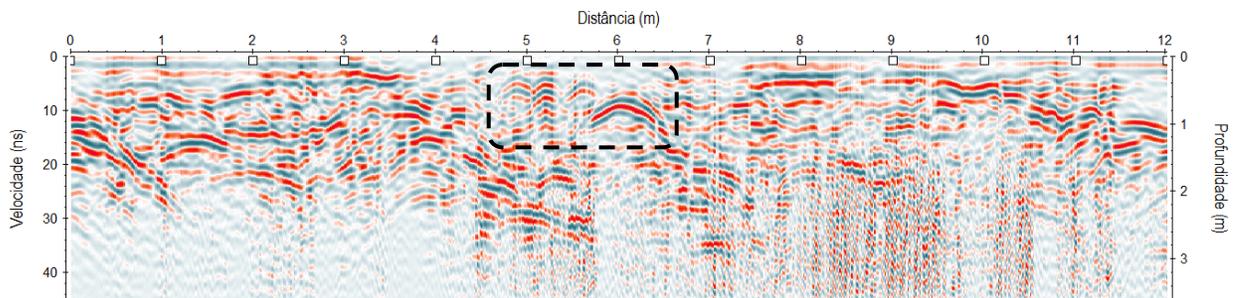


Figura 26 – Perfil 5 (T7) do Palacete Faciola. Hipérboles entre as marcações de 5 m e de 6 m.

O perfil 6 (Figura 27), posição T9 (Figura 10), revela hipérboles nas posições 3 m, 4 m, 6 m e 6,6 m que reforçam a presença de objetos soterrados na área, uma vez que tais eventos se repetem em outros perfis.

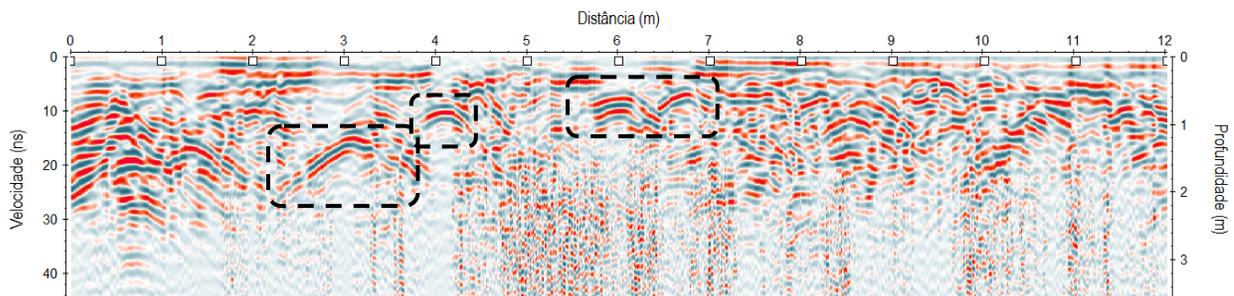


Figura 27 – Perfil 6 (T9) do Palacete Faciola. Revela hipérboles entre as marcações de 3 m e de 7 m.

Analisando o perfil 7 (Figura 28), também transversal (T10) às estruturas e com 12 m de extensão, é possível notar uma estrutura alongada entre as posições 7 m e 9 m, além da hipérbole nas proximidades da posição 6 m.

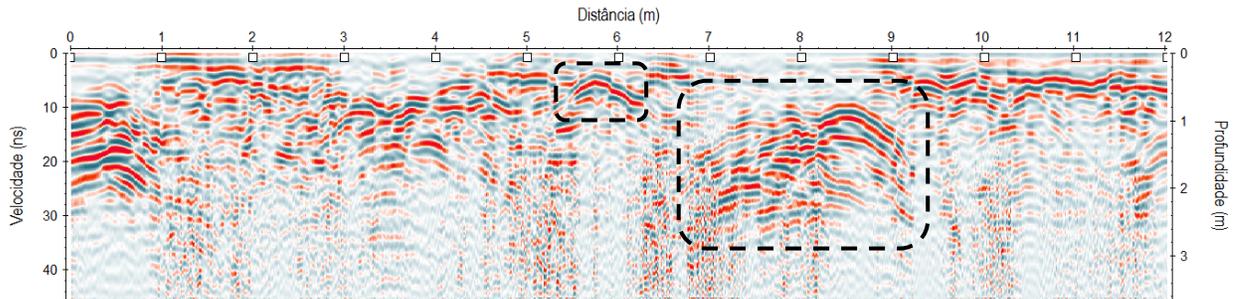


Figura 28 – Perfil 7 (T10) do Palacete Faciola. Estrutura alongada e hipérbole.

O perfil 8 (Figura 29), transversal (T13) e com extensão de 12 m, mostra um solo bastante revolvido e a presença de cinco reflexões (apresentadas no perfil como hipérboles) que se destacam mesmo em meio “caótico”. As hipérboles podem ser observadas nas posições entre 4 m e 5 m, 6 m, entre 7 m e 9 m e entre 10 m e 11 m.

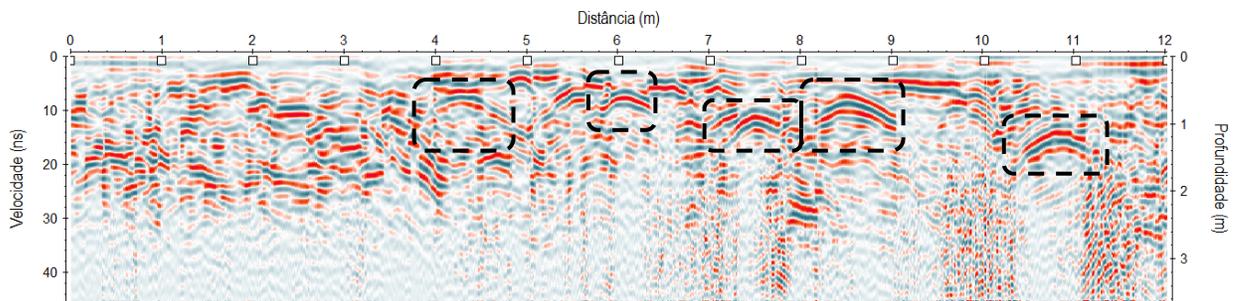


Figura 29 – Perfil 8 (T13) do Palacete Faciola. Hipérboles em meio revolvido.

O perfil 9 (Figura 30), transversal (T15) e com extensão de 12 m, exibe uma estrutura alongada entre as posições 4 m e 7 m e uma estrutura inclinada entre as posições 8 m e 9,5 m. Tais estruturas podem estar vinculadas a presença de resquícios de bases de antigas edificações existentes no local de estudo.

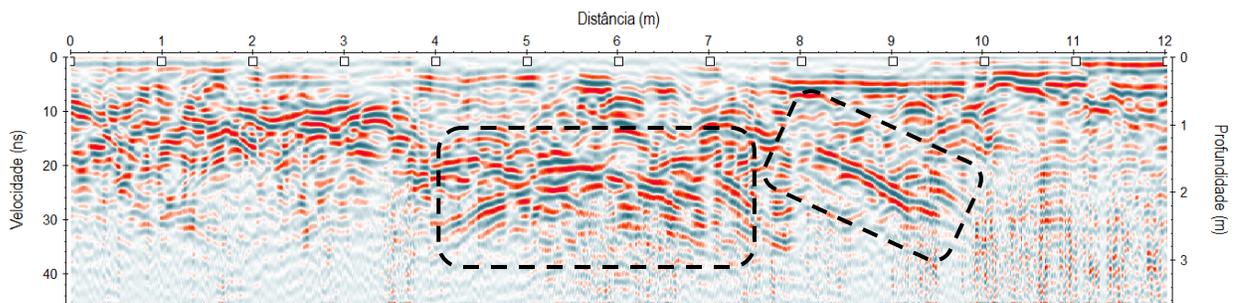


Figura 30 – Perfil 9 (T15) do Palacete Faciola. Estruturas alongadas e inclinadas.

No perfil 10 (Figura 31), transversal (T21) e extensão de 12 m, é possível notar uma camada com uma boa continuidade lateral ao longo do radargrama, podendo ser a antiga camada de ocupação. Nota-se também a presença de uma estrutura alongada entre as posições 2 m e 3 m.

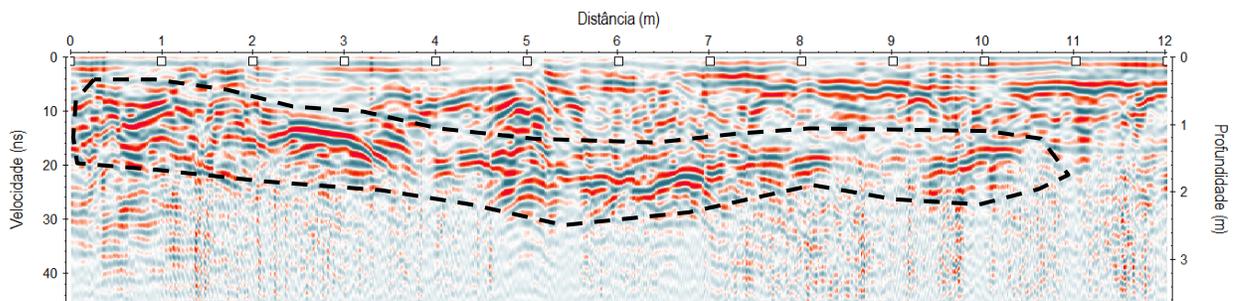


Figura 31 – Perfil 10 (T21) do Palacete Faciola. Camada contínua e estrutura alongada.

O perfil 11 (Figura 32), que corta longitudinalmente (L2 – Figura 10) a área do levantamento e tem 24 m de extensão, exibe três reflexões rasas características de alvos pontuais (hipérboles), que podem estar relacionadas aos enterramentos; uma hipérbole mais profunda que as demais na posição 3 m, podendo estar relacionada à edificações e uma zona atenuação do sinal devido a presença de estrutura alongada acima da zona.

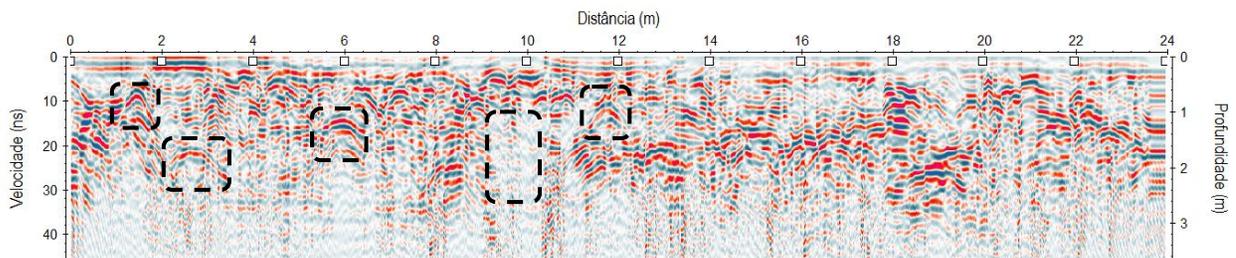


Figura 32 – Perfil 11 (L2) do Palacete Faciola. Hipérboles e zona de atenuação do sinal.

No perfil 12 (Figura 33), longitudinal (L5) e extensão 24 m, é possível visualizar a presença de três hipérboles rasas entre as posições 6 m e 10 m, uma estrutura alongada e inclinada da marcação do início do perfil até 2 m e zonas de atenuação do sinal, como destacado nas proximidades da marcação de 10 m.

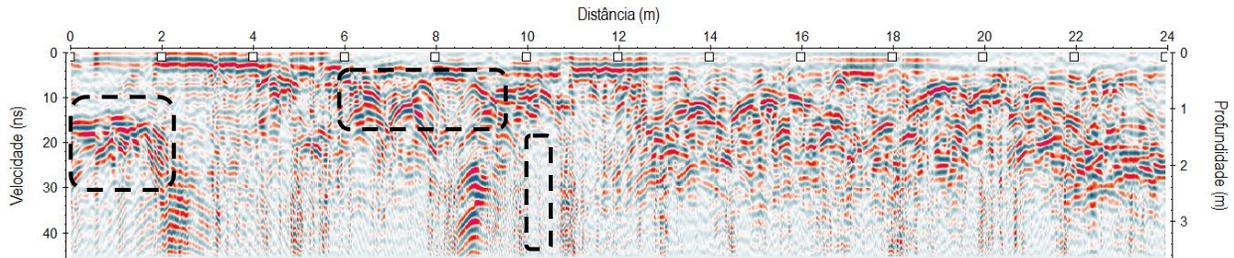


Figura 33 – Perfil 12 (L5) do Palacete Faciola. Hipérboles, estrutura inclinada e zona de atenuação.

Na Figura 34 (perfil 13), longitudinal (L7) e extensão de 24 m, nota-se a presença de estruturas alongadas, nas posições das marcações de 4 m e entre 16 m e 18 m, que exibem uma zona de atenuação do sinal bem abaixo das mesmas. Entre as marcações 8 m e 10 m há a presença de duas hipérboles sendo uma mais rasa, possivelmente relacionada a sepultamentos e outra mais profunda, que pode estar relacionada a edificações.

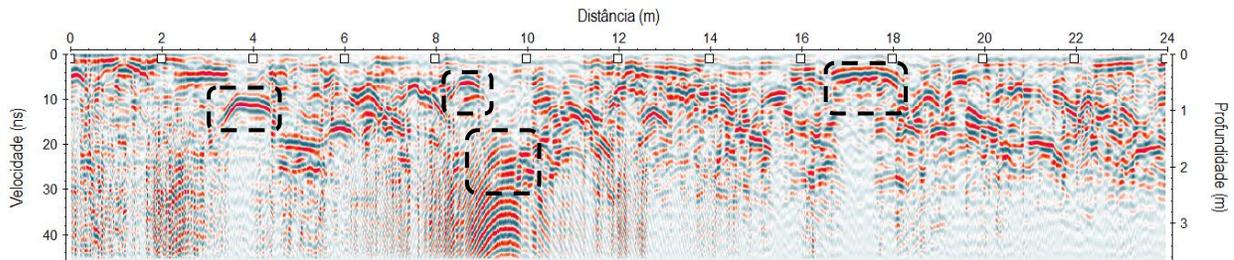


Figura 34 – Perfil 13 (L7) do Palacete Faciola. Hipérboles e estruturas alongadas.

Observando o perfil 14 (Figura 35), longitudinal (L10) e extensão 24 m, observa-se nitidamente a presença de uma hipérbole, de grande abertura, entre a posição 1 m e 3,8 m e uma zona de atenuação bem abaixo da mesma. Também é possível notar várias pequenas hipérboles e uma zona de atenuação bem abaixo, “quebrando” a continuidade dos refletores, caracterizando assim um solo bastante revolvido.

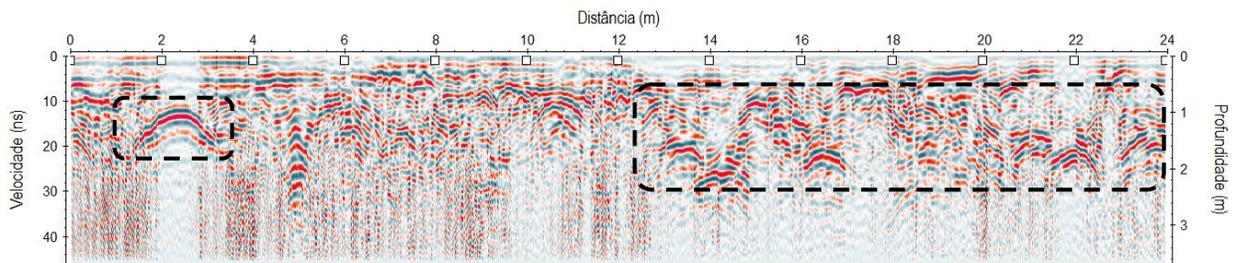


Figura 35 – Perfil 14 (L10) do Palacete Faciola. Hipérboles em solo revolvido e zonas de atenuação.

O perfil 15 (Figura 36), longitudinal (L11) e extensão de 24 m, exibe uma estrutura alongada e inclinada do início do perfil até a posição 1,8 m, seguido de uma zona de atenuação do sinal. Bem como no perfil 14 é possível notar a presença de hipérboles em meio ao solo revolvido e zonas de atenuação.

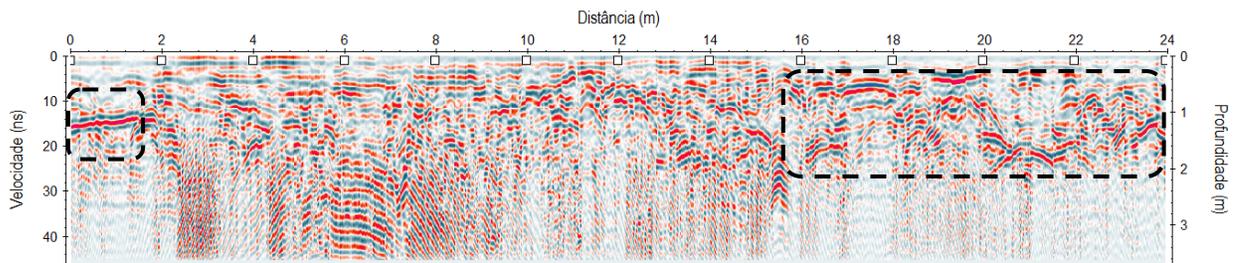


Figura 36 – Perfil 15 (L11) do Palacete Faciola. Hipérboles, estruturas alongadas e inclinadas.

Os radargramas obtidos na área dos fundos do Palacete Faciola, tanto transversalmente quanto longitudinalmente, permitiram a confecção de um modelo 3D e perfis em profundidade, *depth slices* (Figura 37). Estas formas de visualização ilustram mais fortemente a variação de velocidade tanto lateralmente quanto verticalmente, em função das heterogeneidades do meio. O *depth slices* feito a 0,5 m, mostra o quanto pequenas porções de elementos no solo podem influenciar na interpretação dos perfis 2D.

Os radargramas revelaram diversas feições anômalas, representadas por hipérboles e estruturas alongadas. Estas anomalias podem estar associadas a tubulações e resquícios de edificações antigas transversais ao sentido do levantamento, bem como sepultamentos e objetos relacionados a eles.

As hipérbolas com profundidade menor e abertura maior que as demais, têm um grande potencial de estarem relacionadas a itens de edificações, tais como canos, restos de paredes e tijolos. Já as hipérbolas em profundidade maior e abertura menor têm probabilidade maior de estarem associados aos sepultamentos.

Reflexões contínuas, como estruturas alongadas, também podem ser observadas nos perfis, podendo estar ligadas à presença de alicerces de edificações (paredes ou muros) dispostas paralelamente aos perfis.

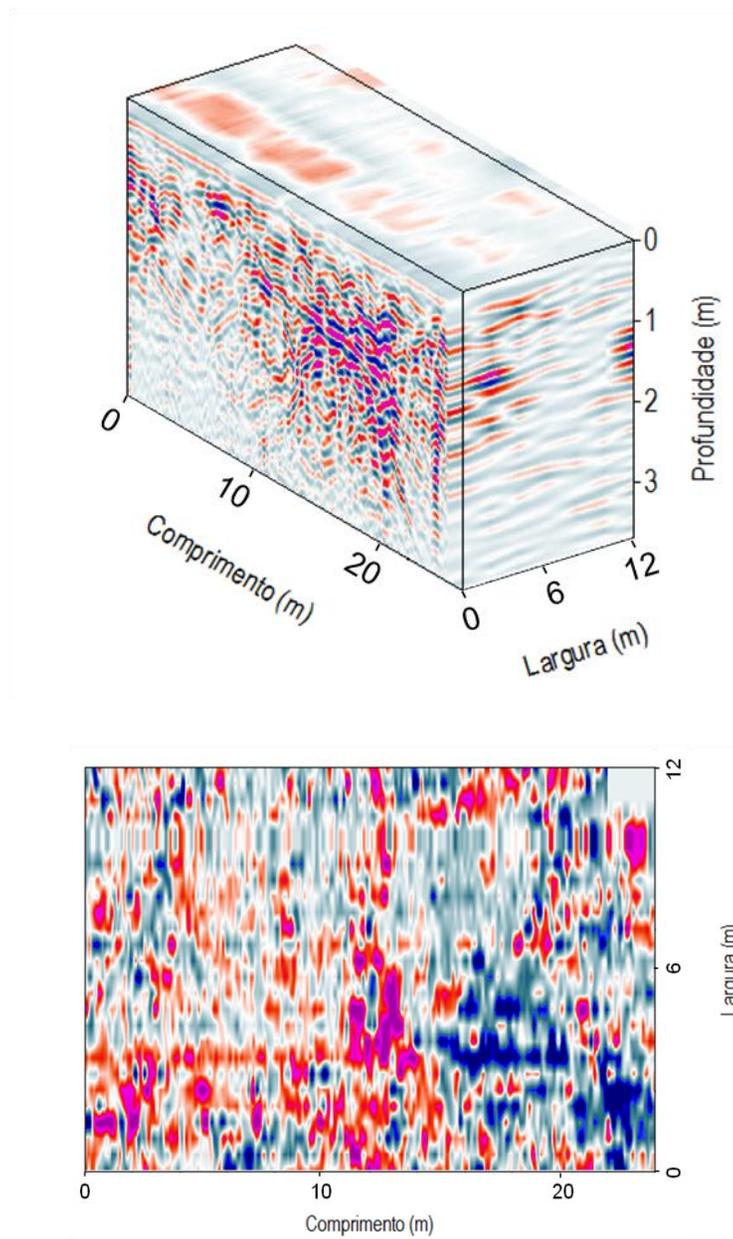


Figura 37 – Cubo construído a partir dos perfis 2D (parte superior da figura) e *depth slice* a 0,5 m.

A localização das anomalias detectadas com o GPR pode ser observada na Figura 38. Os círculos vermelhos marcam a posição do centro de hipérboles. As setas vermelhas indicam a posição de estruturas alongadas, que podem ser alicerces de paredes. As elipses A, B, C, D mostram locais para escavações preliminares.

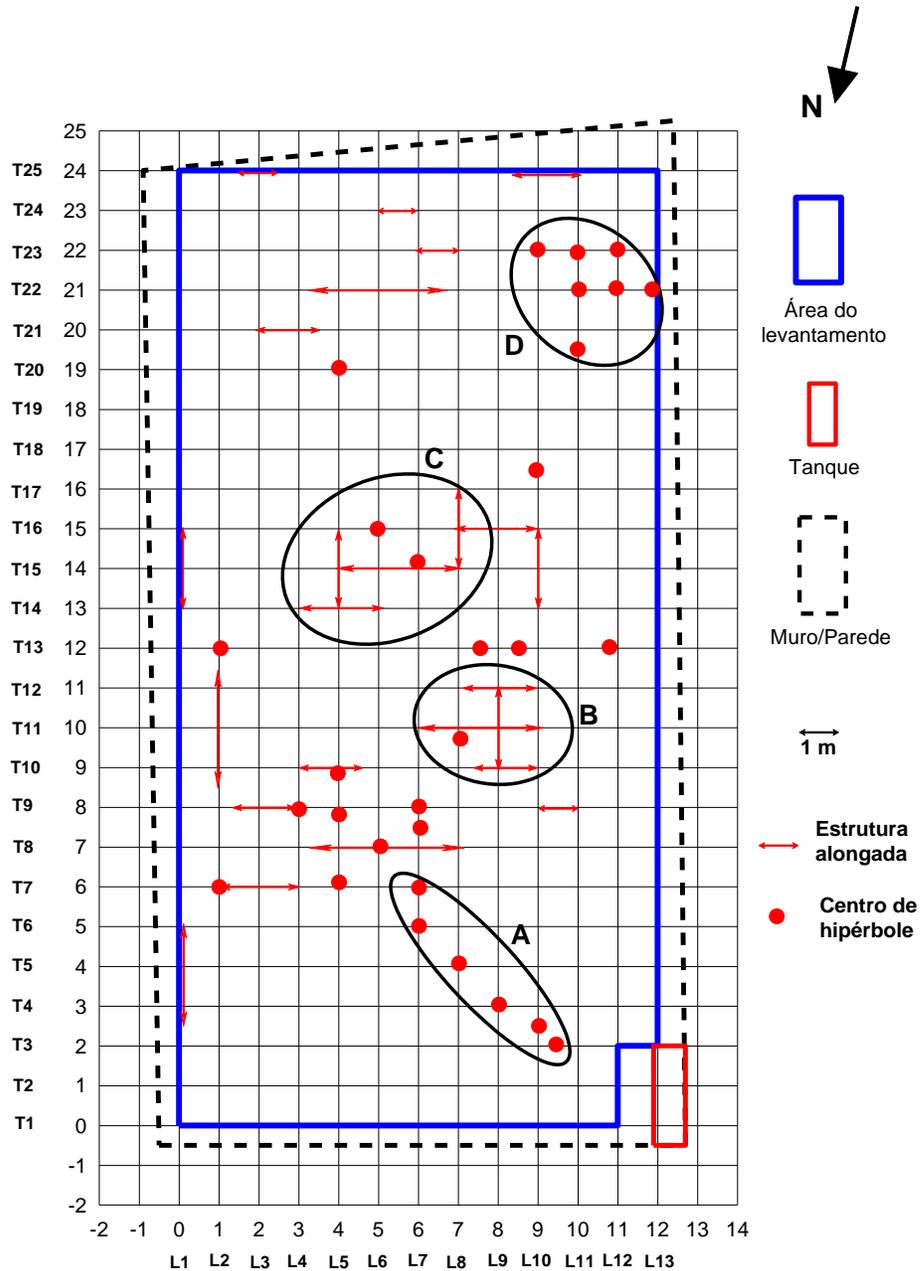
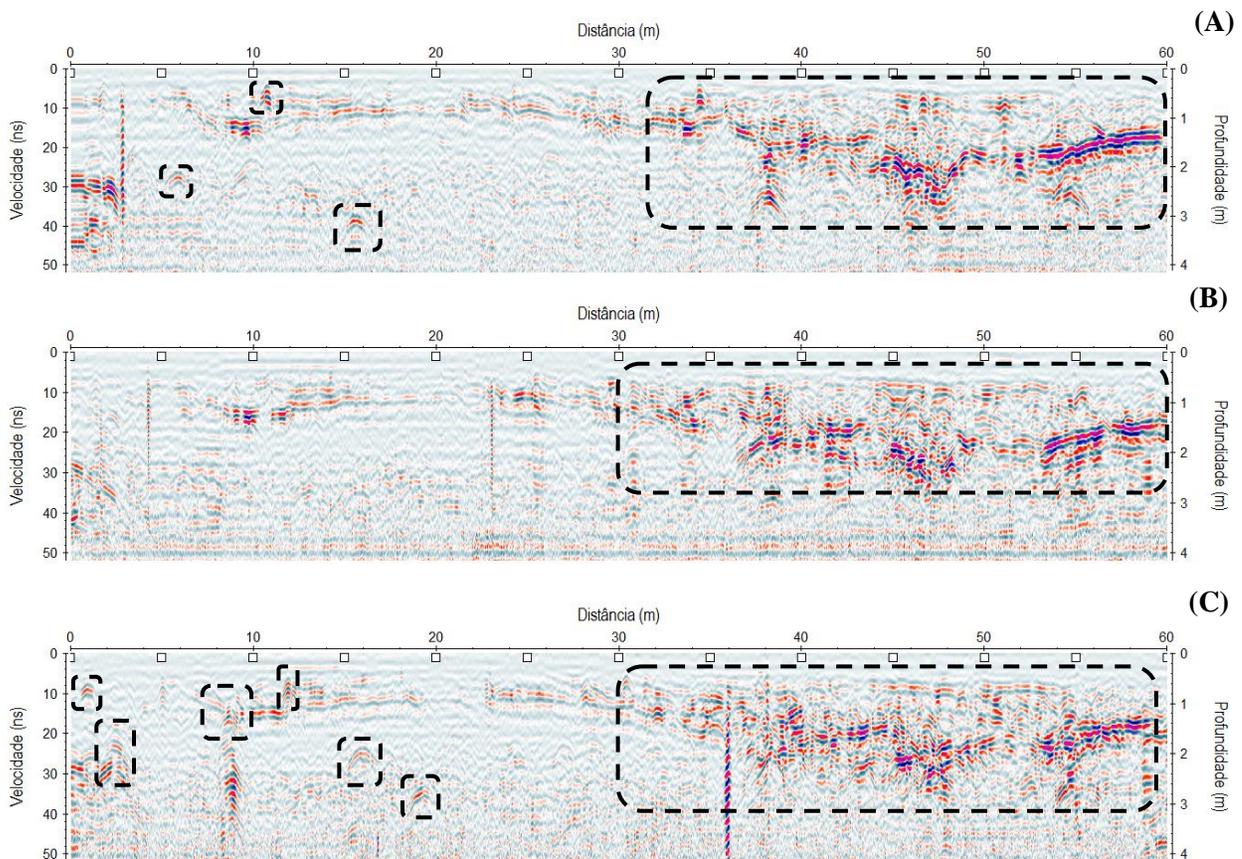


Figura 38 – Localização das anomalias na área do Palacete Faciola.

3.2 ÁREA 4A (SANTARÉM/PA)

Os perfis coletados na Área 4A (um total de 573 perfis) foram executados de forma transversal (extensão variando entre 15 m e 59 m) às estruturas em subsuperfície observadas em um corte de estrada ao lado da área do levantamento.

Nos perfis de 37 à 42 (Figura 39), adquiridos na área principal a 9 m do alambrado que cerca a área na porção Norte e 0,25 m equidistantes um do outro (sequencialmente), apresentam hipérboles com profundidades variáveis e pequenas aberturas nos primeiros 20 m, caracterizando objetos bem pequenos. Entre as posições de 30 m e 60 m é possível notar uma zona com reflexões do tipo *hummocky* (ALVES, 1999; ROSSETTI *et al.*, 2001) em que a camada se apresenta de forma côncava, formando depósito sedimentar na forma de canal.



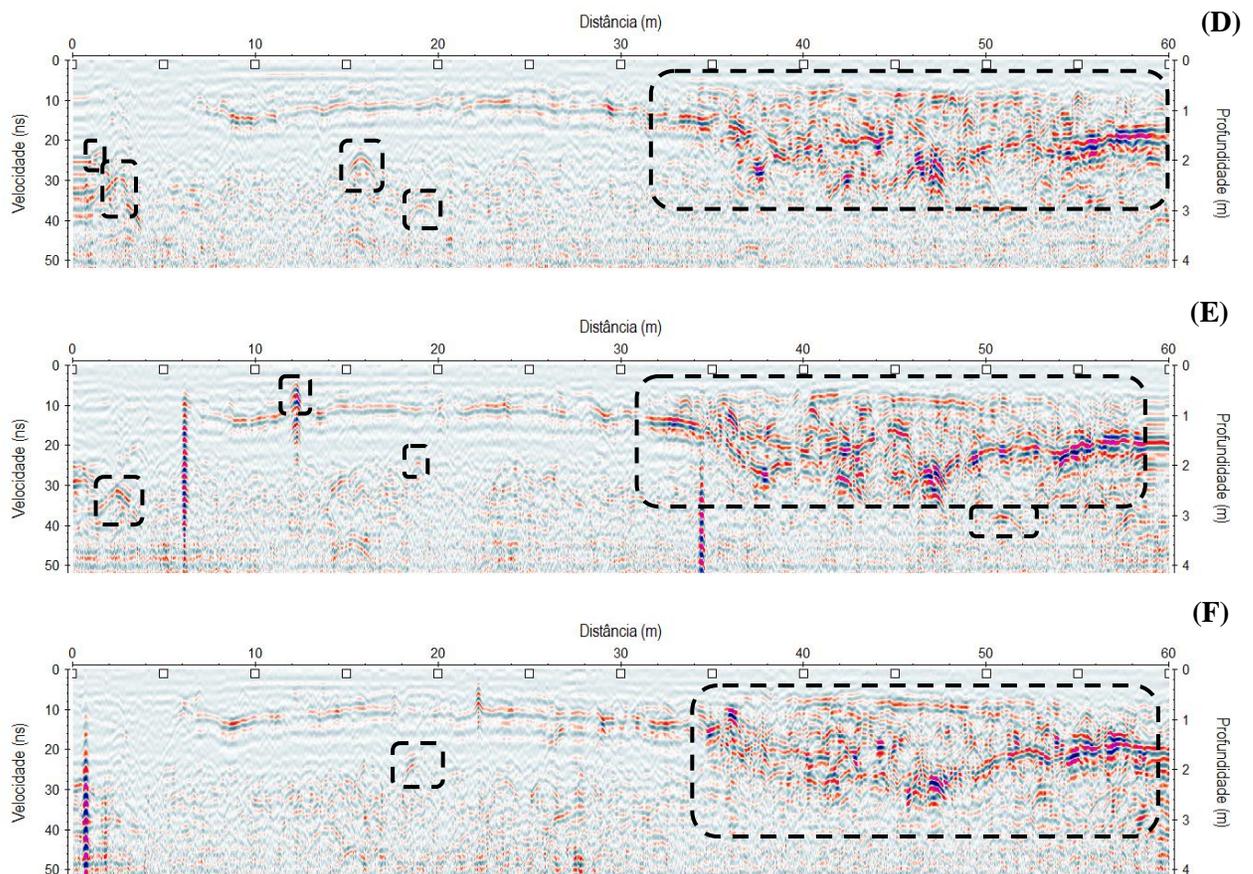


Figura 39 – Perfil 37 (A), Perfil 38 (B), Perfil 39 (C), Perfil 40 (D), Perfil 41 (E) e Perfil 42 (F) do Porto Cargill. Pequenas hipérboles e reflexões do tipo *hummocky*.

Os perfis supracitados apresentam informações coincidentes tanto em relação às posições das hipérboles (à exceção de poucas), quanto às reflexões do tipo *hummocky* no final do perfil, a partir da marcação de 30 m. As hipérboles de pequena abertura encontradas a uma profundidade variável, podem estar associadas aos fragmentos cerâmicos. As zonas que apresentam reflexões do tipo *hummocky* caracterizam uma estrutura sedimentar com alto influxo de resquícios da ocupação dos Tapajós.

O perfil 80 (Figura 40) mostra o comportamento da reflexão *hummocky* ao longo da área do levantamento. É possível observar que a zona, que apresenta as estruturas com esse tipo de reflexão, vai ficando cada vez mais reduzida à medida que há um afastamento da cerca localizada na porção Norte. Neste perfil também é possível notar um refletor alongado nas proximidades da marcação de 15 m e um grupo de pequenas hipérboles entre as marcações 20 m e 30 m.

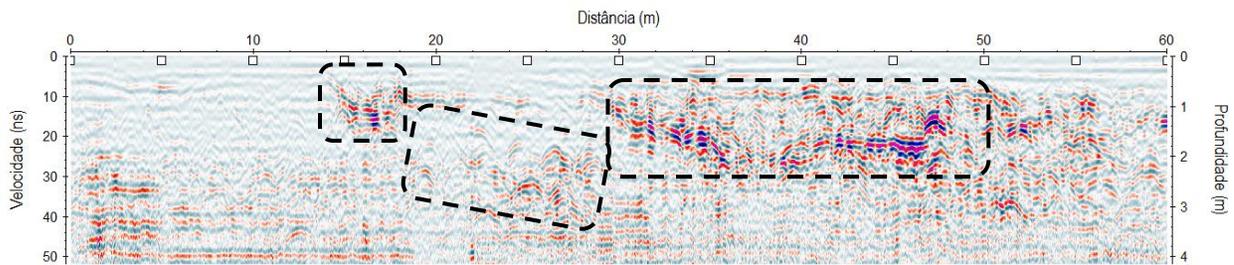


Figura 40 – Perfil 80 do Porto Cargill. Grupo de pequenas hipérbolas e reflexões do tipo *hummocky*.

No perfil 82 (Figura 41) nota-se um reforço da idéia de redução da área da estrutura que se comportava como um “vale” sedimentar. Observa-se também que em locais onde antes se apresentavam como “limpos”, agora exibem uma série de pequenas hipérbolas, como pode ser notado nas posições 20 m e entre as marcas 25 m e 30 m.

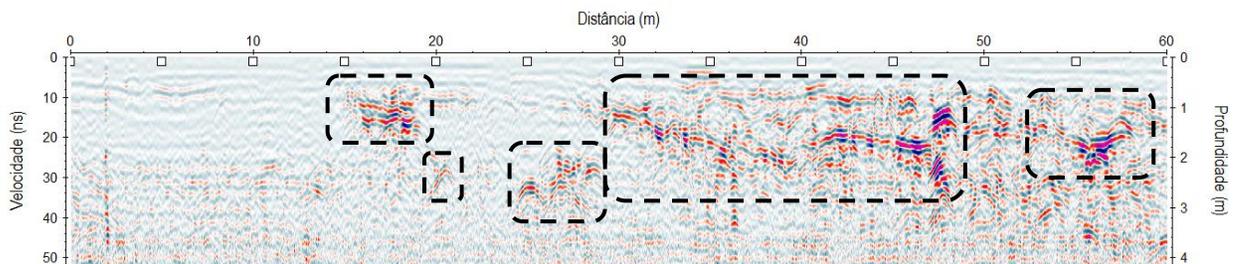


Figura 41 – Perfil 82 do Porto Cargill. Pequenas hipérbolas e redução da estrutura *hummocky*.

O perfil 89 (Figura 42) mostra que à essa metragem em relação a cerca Norte, a porção em que se encontrava a estrutura caracterizada como *hummocky*, apresenta-se como uma zona de solo bastante revolvido (reflexão caótica) e não se é mais possível delimitar a base de tal estrutura.

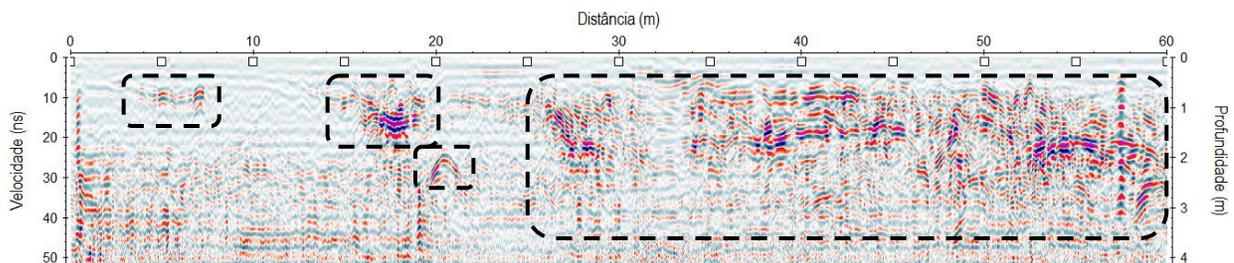


Figura 42 – Perfil 89 do Porto Cargill. Solo revolvido e ausência da estrutura *hummocky*.

No perfil 108 (Figura 43) observa-se uma estrutura com reflexão do tipo *hummocky* entre as marcações 10 m e 45 m e a presença hipérboles bem destacadas ao longo do perfil. Uma zona com hipérboles formando uma “estrutura” inclinada é notada ao final do perfil, entre 45 m e 57 m.

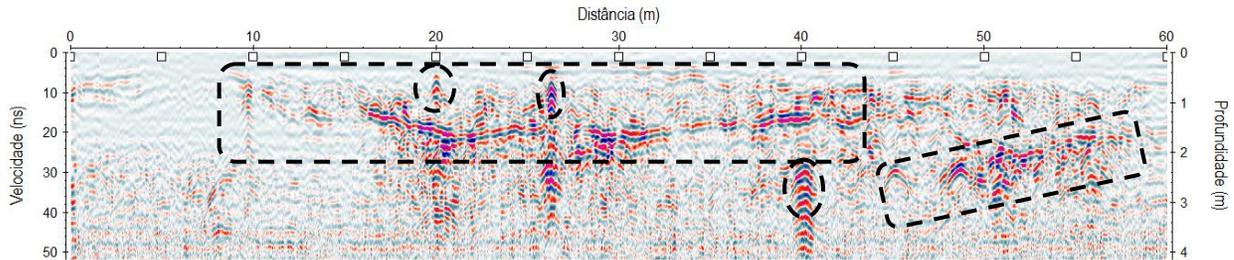


Figura 43 – Perfil 108 do Porto Cargill. Estrutura *hummocky* e hipérboles em formação inclinada.

O perfil 128 (Figura 44) apresenta estruturas em forma de “vales” e a região ao redor, com reflexões que acompanham sua tendência. Observa-se também que essas estruturas iniciam na marcação 10 m e se estendem até 35 m, em que se inicia uma nova zona *hummocky* até a marcação de 55 m.

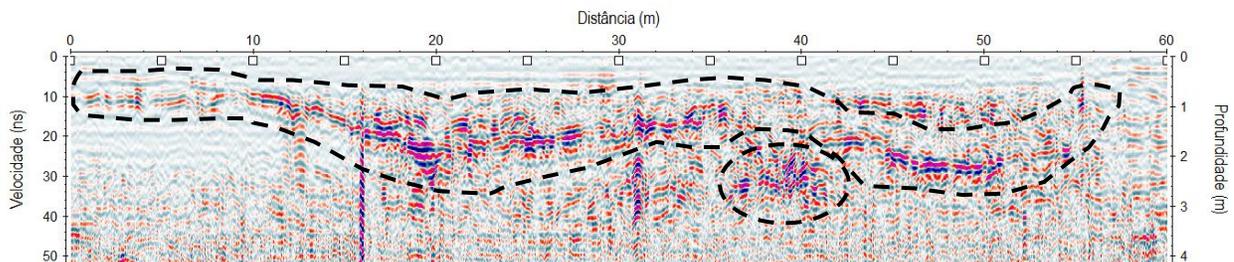


Figura 44 – Perfil 128 do Porto Cargill. Estruturas *hummocky* e camada ondulada.

O perfil 423 (Figura 45), adquirido no início do campo de futebol presente na área do levantamento, mostra uma hipérbole com grande abertura nas proximidades da marcação 4,8 m, podendo esta estar relacionada a alguma tubulação existente no subsolo e hipérboles menores com grandes reverberações, nas marcações 5,5 m e 15,5 m. Uma zona de forte reflexão do sinal, que surge de forma abrupta no radargrama, pode ser observada entre as marcações 18 m e 30 m.

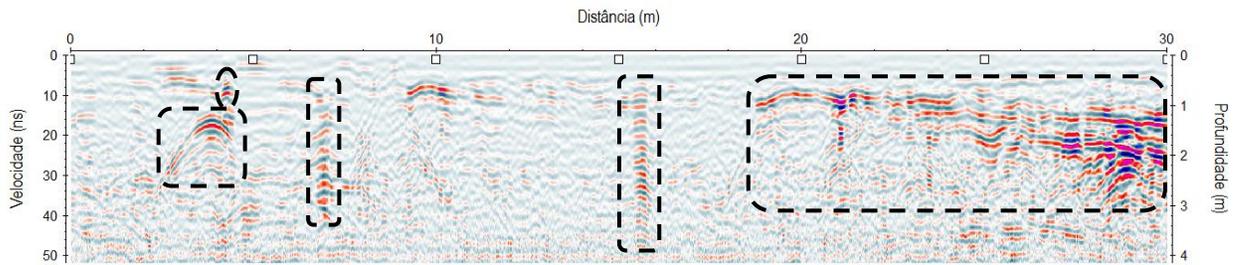


Figura 45 – Perfil 423 do Porto Cargill. Hipérboles e zona de forte reflexão do sinal.

No perfil 546 (Figura 46) nota-se que a hipérbole com grande abertura, antes descrita no perfil 423, repete-se aproximadamente na mesma posição; indicando uma tubulação que passa transversalmente ao levantamento. A energia reverberada em uma hipérbole também é possível de ser observada na posição 9,5 m e 24 m.

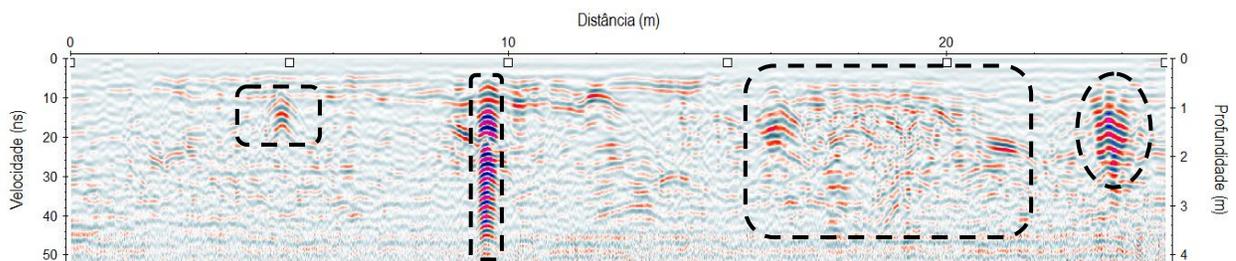


Figura 46 – Perfil 546 do Porto Cargill. Hipérboles e reverberação da energia.

O perfil 572 (Figura 47) apresenta reflexões hiperbólicas em posições bem similares às indicadas no perfil 546, fortalecendo ainda mais a probabilidade da difração ser ocasionada pela presença de uma tubulação transversal ao perfil. O mesmo acontece com a hipérbole na posição 10 m e 5 m que possui reverberação da energia. Uma reflexão inclinada ao final do perfil pode ser devido que no final do campo de futebol onde existe um pequeno muro para nivelamento do terreno, que pode ter provocado um efeito de borda.

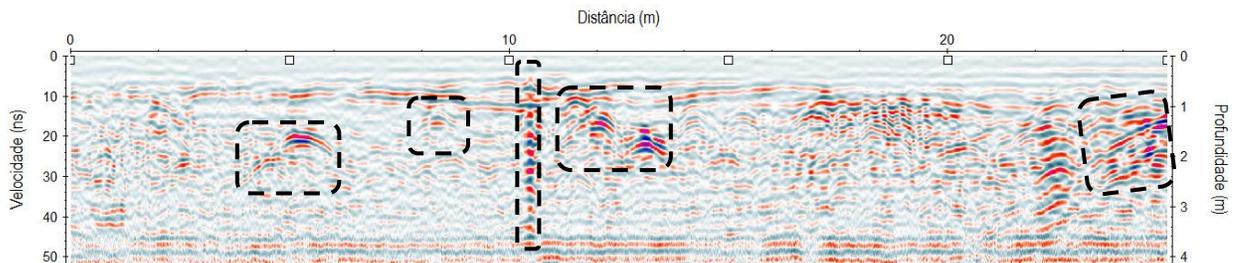


Figura 47 – Perfil 572 do Porto Cargill. Hipérboles ao logo do perfil.

Construiu-se um modelo 3D a partir da interpolação dos perfis 2D, da área principal da Área 4A, e perfis em profundidade (parte superior da Figura 48), em que nota-se que a zona de reflexão do tipo *hummocky*, pode ser um “bolsão” com fragmentos arqueológicos, devido sua formação geológica ocorrer em uma região com alto índice de influxo dos materiais circundantes. Algumas hipérbolas com pequena abertura, apresentadas de forma isolada, podem ser devido à presença na subsuperfície, de artefatos de pequeno porte.

O *depth slice* feito a 1 m de profundidade revela as bordas da estrutura *hummocky* e que as reflexões no interior da estrutura são mais abundantes do que fora. Fato que pode ser facilmente observado pela mudança na coloração do perfil em profundidade.

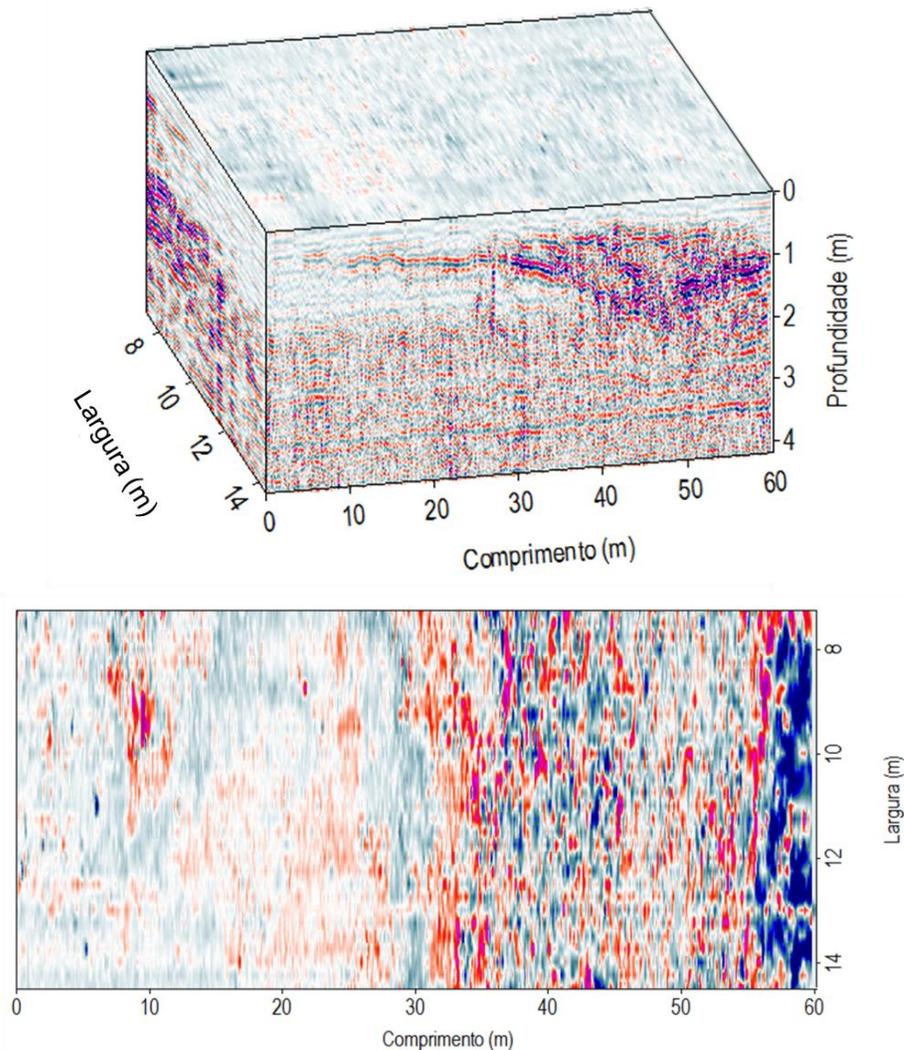


Figura 48 – Cubo construído a partir dos perfis 2D (parte superior da figura) e *depth slice* a 1 m.

Os perfis executados no campo de futebol revelam difrações, características de tubulações, que devem cortar transversalmente a área do levantamento. Reflexões ao final do perfil também podem ser observadas, principalmente por se apresentarem com uma coloração mais intensa.

Observando os radargramas da área principal e do campo de futebol mapearam-se os locais mais indicados para a realização de escavações (Figura 49). Os destaques em vermelho translúcido A, B e C representam os locais mais indicados para as escavações preliminares. Até a finalização desse trabalho, já haviam sido abertas duas trincheiras (trincheira 01 e 02) nas zonas hachuradas da Figura 49. Essas trincheiras foram abertas após a entrega do relatório técnico referente ao levantamento geofísico do Programa de Salvamento Arqueológico do Sítio PA-ST-42: Porto de Santarém.

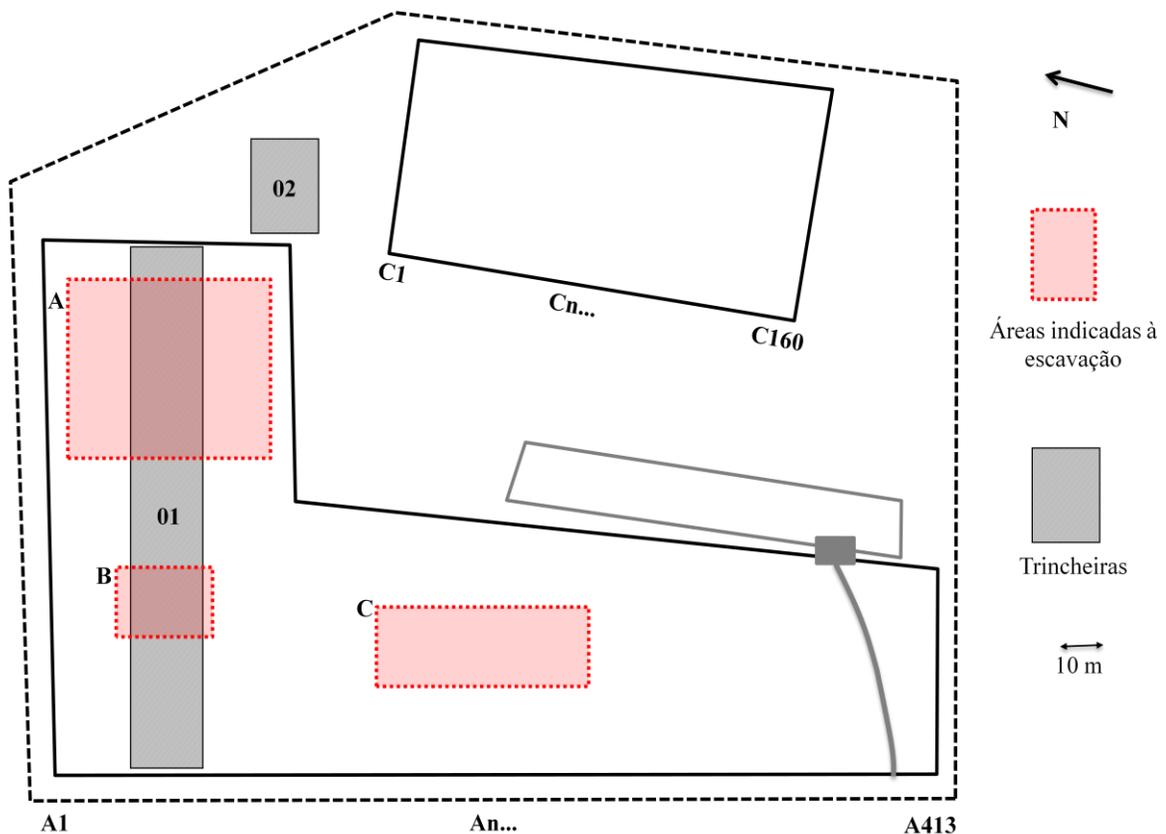


Figura 49 – Localização das áreas indicadas à escavação da Área 4A.

3.3 ESCAVAÇÕES

Até a finalização deste trabalho nenhuma escavação havia sido realizada no Palacete Faciola. Na Área 4A do sítio PA-ST-42, entretanto, duas trincheiras foram abertas (Figura 50).

Uma das trincheiras (trincheira 01, destacada em amarelo na Figura 50) foi aberta na região do levantamento GPR, a 10 m da cerca localizada na parte Norte da área e tem as dimensões 80 m x 3 m. A outra trincheira foi aberta fora da região do levantamento GPR (trincheira 02 na Figura 50).

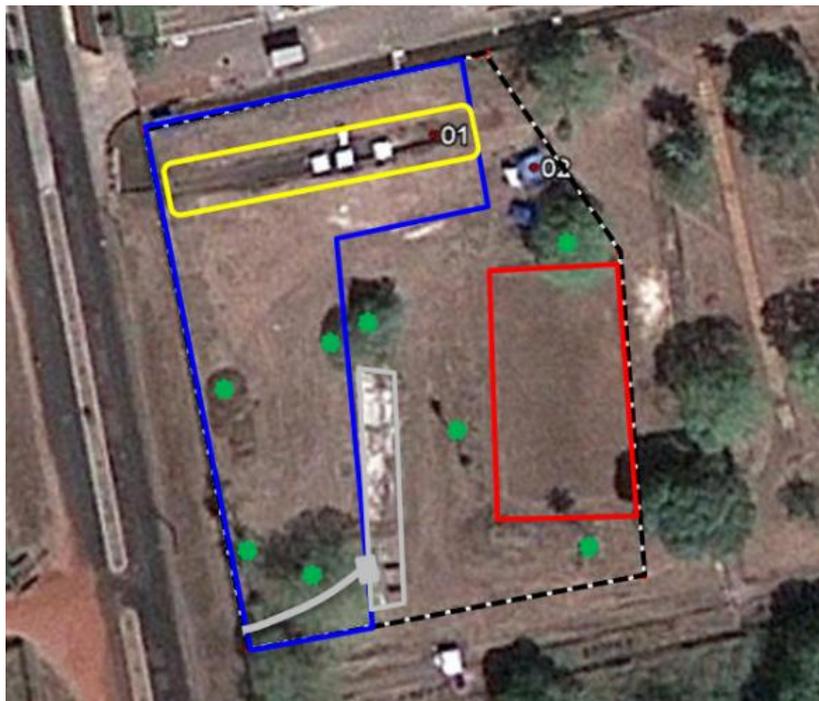


Figura 50 – Foto aérea mostrando as áreas de escavação no Porto Cargill. 01 e 02 indicam a posição das trincheiras escavadas na área.

Na trincheira 01 foi possível visualizar a estrutura que produzia as reflexões do tipo *hummocky*, nos radargramas, bem como fragmentos arqueológicos contidos nessa estrutura

(Figura 51). Foi possível também observar que as camadas do solo possuem colorações diferentes e que os artefatos arqueológicos se encontram em profundidade bem pequena (Figura 51).



Figura 51 – Fotos das escavações realizadas na Área 4A do Porto Cargill (Fotos: Marcio Amaral).

A maior porção dos fragmentos foi encontrada no interior da estrutura que causou as reflexões *hummocky* e é composta por abrasadores, lâminas de machados, pedaços de lâminas diversas, pedaços de estatuetas de vários tipos, vasos efígies (vasos com desenhos de figuras do corpo humano, normalmente de pessoas já falecidas), flanges (objeto utilizado para fazer a junção entre dois elementos) vermelhas com apliques em espiral e zoomorfos, entre outros. Os registros fotográficos dos fragmentos arqueológicos encontrados durante as escavações foram gentilmente cedidos por Márcio Amaral (Figura 52).

De acordo com o Projeto de Salvamento do Sítio Arqueológico PA-ST-42 em que a Área 4A está inclusa, os fragmentos encontrados com as escavações após coletados serão classificados e datados para posteriormente serem colocados em um museu em homenagem aos povos Tapajós, que será montado na cidade de Santarém/PA.

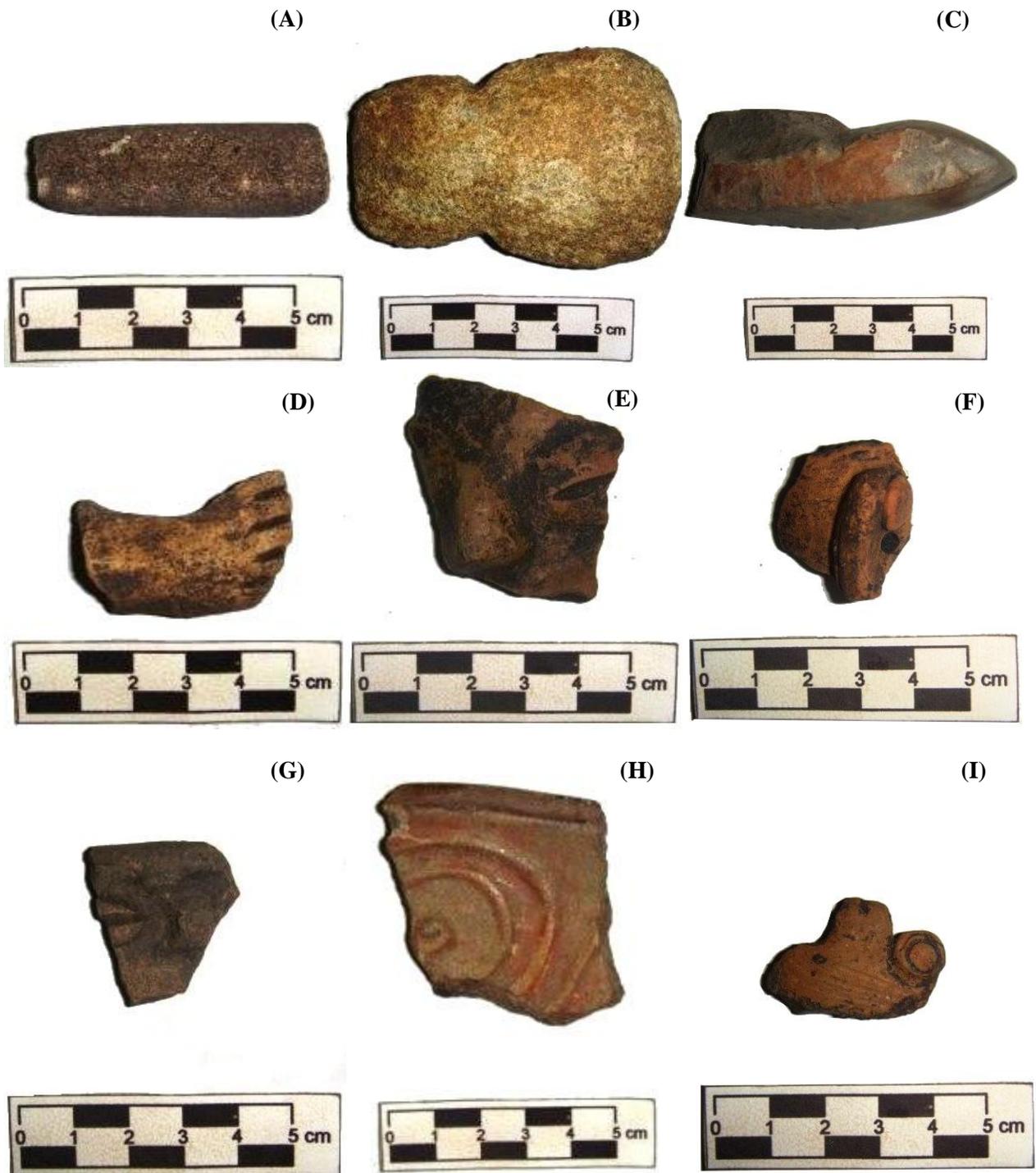


Figura 52: Fotos dos fragmentos encontrados nas escavações. (A) abrasador interno. (B) lâmina de machado. (C) pedaço de lâmina. (D) braço de estatueta. (E) face de estatueta de base semilunar. (F) orelha de estatueta com alargador. (G) vaso efígie. (H) flange vermelha com aplique em espiral. (I) flange zoomorfa (Fotos: Marcio Amaral).

4 CONCLUSÕES

O método GPR evidenciou zonas anômalas que podem estar associadas às feições arqueológicas procuradas nesta pesquisa, bem como estruturas geológicas no subsolo. Expôs com boa resolução a localização aproximada de fragmentos arqueológicos pequenos e delimitou satisfatoriamente a base das estruturas geológicas que produziram reflexões do tipo *hummocky*.

Os perfis adquiridos na área dos fundos do Palacete Faciola, localizado na cidade de Belém, estado do Pará, mostraram diversas feições anômalas, representadas por hipérboles e estruturas alongadas. E estas anomalias podem estar associadas tanto com os sepultamentos, quanto com tubulações, bem como podem estar ligadas à presença de alicerces de edificações (paredes ou muros) dispostas paralelamente aos perfis. Sugere-se a realização de escavações nas áreas com maior índice de ocorrência de anomalias.

O levantamento realizado na Área 4A do Sítio Arqueológico PA-ST-42, revelou hipérboles de pequena abertura encontradas a uma profundidade variável, associadas tanto aos fragmentos cerâmicos, quanto a tubulações. Zonas que apresentam reflexões do tipo *hummocky*, caracterizando uma estrutura sedimentar com alto influxo de fragmentos arqueológicos provenientes da ocupação dos Tapajós também foram bem imageadas.

As escavações realizadas na área principal da Área 4A revelaram as estruturas e fragmentos anômalos que foram evidenciados nos perfis de GPR. Diversos fragmentos foram coletados e descritos, para posterior datação e colocação em um museu a ser construído na cidade de Santarém/PA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-QUADI, I. L.; LAHOUAR, S. Measuring layer thicknesses with GPR – Theory to practice. **Construction and Building Materials**, v. 19, p. 763-772. 2005.

ALVES, R. A. **Estudo Sismoestratigráfico da Bacia do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha) - UFF, 1999. 127 p.

ANNAN, A. P. Practical Processing of GPR data. IN: **Proceedings of the Second Government Workshop on Ground Penetrating Radar**, Columbus, Ohio, 1993. 26p.

ARAGÃO, R. C. **Metodologia Geofísica Aplicada à Pesquisa de Salvamento Arqueológico nos Sítios Bittencourt, Jambuaçu e Jaburu, Estado do Pará**. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – UFPA- CG, Belém, 2006. 71 f.

BALEIXE, Haroldo. **Fotos do Palacete Faciola**. Disponível em <<http://haroldobaleixe.blogspot.com>> Acesso em: 21 de fevereiro de 2011.

BANDEIRA, D. R. (Org.). Pesquisa de Salvamento Arqueológico do Sítio Histórico Foz do Cubatão, Joinville/SC. **Relatório Final**. Joinville, 2001. 94 p.

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. **Anais do 6th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, 1999. 4 p.

BAUER, A. **Christian Hülsmeier and about the early days of radar inventions - a survey**. Delft: The Netherlands. 2005a. 74 p.

_____ **Christian Hülsmeier and about the early days of radar inventions - a survey – Part II**. Delft: The Netherlands. 2005b. 18 p.

BORGES, W. R. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicação no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**. (Tese de Doutorado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2007. 260 f.

BRANDWOOD, D. **Fourier Transforms in Radar and Signal Processing**. London: Artech House. 2003. 212 p.

BRITO-SCHIMMEL, P.; PORSANI, J. L.; FIGUTI, L.; DeBLASIS, P. **Aplicação de Métodos Geofísicos em Arqueologia: Primeiros Resultados Obtidos no Sambaqui Fluvial Capelinha, Cajati-SP, Brasil**. Rev. Do Museu de Arqueologia e Etnologia, São Paulo, 2002. 12 p.

- CASTRO, J. M.; BERTOL, G. A.; SHIRAIWA, S.; HIROOKA, S. Aplicação do GPR na Localização de Artefatos Arqueológicos na Casa Dom Aquino em Cuiabá, MT. **Anais do I Simpósio Regional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2004.** 4 p.
- CEZAR, G. DA S.; DA ROCHA, P. L. F.; BUARQUE, A.; DA COSTA, A. Two Brazilian Archaeological Sites Investigated by GPR: Serrano and Morro Grande. **Journal of Applied Geophysics**, Vol. 47, 2001. 13 p.
- CLARK, M. R.; GILLESPIE, R.; KEMP, T.; MCCANN, D. M.; FORDE, M. C. Etromagnetic properties os railway ballast. **NDT & E International**, v. 32, p. 305-311 2001.
- DANIELS, D. J. **Ground Penetrating Radar 2nd Edition.** London: The Institution of Electrical Engineers. 2004. 761 p.
- 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.
- FUNARI, P. P. A. Teoria e Métodos na Arqueologia Contemporânea: O Contexto da Arqueologia Histórica. **Mneme – Revista de Humanidades**, Vol. 6, Nº 13, 2005. 5 p.
- GALLI, V. L; SOUZA, L. A. P. GPR – Exemplos de Aplicação. **Anais do 6th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, 1999. 4 p.
- LUIZ, J. G. Geofísica Aplicada à Arqueologia no Estado do Pará, Brasil. **Anais do 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, 2009. 6 p.
- LUIZ, J. G.; PEREIRA, E. S. Prospecção arqueológica por métodos geofísicos no Sudeste do Pará: O caso do Sítio Domingos, Canaã dos Carajás. **Anais do 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, 2005. 6 p.
- MAHAFZA, B. R. **Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB.** Alabama: Chapman & Hall/CRC, 2000. 533 p.
- MELO, M. S.; LUIZ, J. G.; MARQUES, F. L.; BARRADAS, J. A.; GOMES, K. P.; MEDEIROS, A. R. Investigação Geofísica no Sítio Arqueológico Engenho Murutucu, Belém-PA. **Anais do 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, 2007. 5 p.
- MESSINGER, J. Effective automatic picking of traveltime data with high precision. International Conference on Ground Penetrating Radar, 10., Delft, **The Netherlands**, 2004. 4 p.
- OLHOEFT, G. R. **Application of Ground Penetrating Radar:** in Proceedings of the 6th Int'l. Conf. on Ground Penetrating Radar, GPR'96, Sept 30- Oct 3, Sendai. 1996. 4 p.
- OLIVEIRA, C. E.; BORGES, W. R.; MARQUES, R. M.; TOURINHO, M. E.; SANTOS, E. L.; ALMEIDA, S. L. Mapeamento GPR das Ruínas do Convento de São Boaventura, Itaboraí/RJ. **Anais do III Simpósio Brasileiro de Geofísica**, 2008. 6 p.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; SOUZA, L. S. B. **Estratigrafia da Sucessão Sedimentar Pós-Barreiras (Zona Bragantina, Pará) com base em Radar de Penetração no Solo**. Brazilian Journal of Geophysics, vol. 19 (2), 2001. 18 p.

SANDMEIR, K. J. **Manual do software REFLEXW** – version 4.2. Karlsruhe. 1998. 408 p.

SOUZA, G. C.; MARQUES, R. M.; BORGES, W. R.; CASTELO BRANCO, R. M. Identificação Arqueológica Através da Utilização de Método Geofísico – GPR 3D em Prédios Históricos na Cidade de São Paulo/SP. **Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geofísica**, 2010. 4 p.

STRANNEBY, D. **Digital Signal Processing**. Oxford: Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, 2001. 239 p.

YELF, R. Where is True Time Zero? 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, Delft, **The Netherlands**, p. 279-282. 2004.