

Gradiometria magnética e radar de penetração no solo aplicados em Estearias de Penalva (MA)

Magnetic gradiometry and ground penetrating radar applied in Estearia of Penalva (MA)

Herson Oliveira da Rocha¹, Marcos Welby Correa Silva²,

Fernando Luiz Tavares Marques³, Deusdedit Carneiro Leite Filho⁴

¹Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, Campus de Parauapebas, CEP 68515-970, Caixa Postal 3017, Parauapebas, PA, BR (herson_rocha@hotmail.com)

²Programa de Pós-graduação em Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará - UFPA, Belém, PA, BR (welby@ufpa.br)

³Museu Paraense Emílio Goeldi - MPEG, Belém, PA, BR (fernando@museu-goeldi.br)

⁴Centro de Pesquisa de História Natural e Arqueologia do Maranhão - CPHNAMA, São Luís, MA, BR (decalef@uol.com.br)

Recebido em 18 de junho de 2013; aceito em 18 de novembro de 2014

Resumo

Nesse trabalho são apresentados os métodos geofísicos magnetometria e radar de penetração no solo (GPR) como ferramentas utilizadas na localização de vestígios de ocupações pretéritas no sítio arqueológico Lago da Lontra, localizado no município de Penalva, Estado do Maranhão. Devido à dimensão da área, de cerca de 10.400 m², e do curto período da campanha geofísica foram realizadas medidas magnéticas com gradiômetro em uma malha de amostragem de 2,5 m. As anomalias encontradas evidenciam uma magnetização termo-remanescente proveniente da queima da argila e também de fontes não relacionadas a materiais arqueológicos, tais como pedaços de arreios e ferraduras de montaria, pregos e anzóis, entre outros. Nos locais com magnetização anômala, foram realizados 14 perfis de GPR com uma antena blindada de 400 MHz com o objetivo de localizar e diferenciar com maior precisão as estruturas arqueológicas e as atuais. Os resultados apresentados neste trabalho possibilitaram a verificação e a avaliação da potencialidade de métodos geofísicos como ferramenta auxiliar em estudos arqueológicos, o que foi comprovado pelo sucesso nas indicações dos alvos e pelas posteriores escavações que mostraram a presença de fragmentos cerâmicos e carvão relacionados ao sítio arqueológico.

Palavras-chave: Geofísica; Magnetometria; GPR; Estudos arqueológicos.

Abstract

In this work we present the geophysical methods magnetometry and ground penetrating radar (GPR) as tools used in finding traces of preterit occupations at the archaeological site of Otter Lake, located in the municipality of Penalva, state of Maranhão, Brazil. Because of the size of the area, of about 10,400 m², and the short geophysics campaign, magnetic measurements were performed with a gradiometer, in a sampling grid of 2.5 m. The anomalies found show a thermo-remnant magnetization from the burning of clay, and also from sources not related to archaeological materials, such as pieces of tack and riding horseshoes, nails and hooks, among others. In locations with anomalous magnetization, 14 GPR profiles were obtained with a 400 MHz shielded antenna in order to locate and differentiate more precisely the archaeological and existing structures. The results presented in this work allowed the verification and evaluation of the potential of geophysical methods as an auxiliary tool in archaeological studies, which has been proven by the success of the indications of the targets and the subsequent excavations which revealed the presence of pottery fragments and coal related to the archaeological site.

Keywords: Geophysics; Magnetometry; GPR; Archaeological studies.

INTRODUÇÃO

A aplicação de métodos geofísicos se tornou alvo de grande interesse como ferramenta auxiliar à pesquisa arqueológica, e com isso foi possível o desenvolvimento de estudos passíveis de análise das dimensões e posições de artefatos arqueológicos, bem como auxiliar na localização de antigas estruturas soterradas, apontando, assim, para o local ideal de escavações em sítios arqueológicos com a vantagem de sua natureza não invasiva para execução desse tipo de trabalho.

Os métodos geofísicos voltados ao estudo de sítios arqueológicos satisfazem a necessidade de indicar com maior exatidão os locais para escavação, cujo objetivo é detectar artefatos ou estruturas soterradas no sítio, pois eles normalmente produzem distorções nas propriedades físicas do meio terrestre (Luiz e Silva, 1995).

Os primeiros trabalhos de geofísica aplicada à arqueologia na Amazônia foram realizados em 1977 no Sítio Teso dos Bichos, na Ilha do Marajó, com os métodos magnético e eletrorresistividade (Alves e Lourenço, 1981). Os resultados os levaram à detecção de anomalias relacionadas a antigos locais de queima de materiais cerâmicos. Essas anomalias causadas pela magnetização termo-remanente adquirida pelas argilas no processo de aquecimento-resfriamento possibilitaram a descoberta de antigos fornos, bem como uma urna funerária, soterrada por uma espessa camada de argila. Já o método da eletrorresistividade possibilitou a detecção de camadas compactas de argila de origem arqueológica.

Baseada no sucesso de medidas geofísicas, Roosevelt (1991) realizou novos experimentos nesse mesmo sítio, fazendo uso dos mesmos métodos e acrescentando medidas com os métodos eletromagnéticos indutivos e com o radar de penetração no solo (GPR).

Recentemente, novos levantamentos realizados na região do Rio Anajás, na Ilha de Marajó, utilizaram os métodos magnético, eletrorresistividade e GPR na tentativa de encontrar vestígios de povos que habitaram aquela região (Barradas et al., 1999). As escavações arqueológicas realizadas nos locais indicados por anomalias magnéticas revelaram concentração de fragmentos de cerâmica e cerâmica intacta. As medidas de baixa resistividade, relacionadas às argilas condutivas, sugeriram uma zona mais representativa para ser a camada arqueológica, e as imagens de GPR mostraram regiões de forte atenuação do sinal eletromagnético corroborando as medidas de resistividade.

Bevan e Roosevelt (2003) realizaram levantamento e escavações arqueológicas preliminares na cidade de Guajará, estado do Amazonas, com o intuito de coletar dados sobre os padrões de sedimentos, estruturas e objetos enterrados que possam fornecer subsídios para explicar a história e a organização da comunidade local. Os métodos empregados foram a magnetometria, a eletrorresistividade e a sísmica, cujos resultados forneceram informações úteis para o

planejamento das escavações. A análise dos dados magnéticos indicou zonas com fortes anomalias magnéticas, cuja posterior escavação revelou grande concentração de cerâmica e a presença de uma urna funerária. Os levantamentos de eletrorresistividade e condutividade indicaram áreas de baixa resistividade, cujas anomalias se relacionam a sedimentos finos. Um levantamento sísmico, utilizado para localizar os estratos em profundidade, revelou uma velocidade de onda sísmica P, no topo da colina, de 300 m/s a uma profundidade de 2 m e de uma velocidade de 600 m/s, valores típicos de sedimentos. No entanto, uma camada na parte inferior do monte apresentou velocidade de 2.000 m/s, o que sugere a presença de sedimentos compactos, tais como argila densa ou uma solução salina.

Aragão (2006) realizou estudos arqueológicos empregando geofísica nas cidades paraenses de Abaetetuba, Moju e Almeirim. Os métodos geofísicos utilizados foram magnetometria, cintilometria e GPR. As medidas de cintilometria foram usadas para mapear os solos de Terra Preta Arqueológica (TPA), através da radiação gama natural do solo. Os locais indicados para escavação pela magnetometria e GPR possibilitaram a descoberta de materiais arqueológicos como cerâmica, louça, materiais líticos e artefatos de ferro.

Na área do Engenho Murutucu, em Belém, Pará (Melo, 2007), foram utilizados dados magnéticos de um levantamento obtido anteriormente cujas anomalias apresentaram amplitudes muito elevadas para as amplitudes esperadas sobre materiais cerâmicos. Essas anomalias podem, entretanto, ser relacionadas a alicerces, desde que eles sejam constituídos por rochas básicas, que são materiais com maior susceptibilidade magnética. Através dos perfis de GPR realizados no sítio, foi possível entender o terreno como uma superfície bastante revolvida, talvez consequência de raízes, escavações para plantação ou situações similares. As anomalias apresentadas nos radargramas são caracterizadas por formas hiperbólicas, arqueamentos e descontinuidades. A largura das zonas anômalas identificadas nos radargramas foram posicionadas sobre o mapa magnético a fim de obter uma correlação entre as anomalias magnéticas e as do GPR. Com base nessa sobreposição de informações foram verificadas as regiões anômalas coincidentes e, a partir daí, selecionadas as zonas mais promissoras para intervenção arqueológica visando a localização de vestígios de ocupação e de alicerces da edificação antiga da senzala do Engenho Murutucu, local de grande importância para a história do Pará.

Neste trabalho são descritos os procedimentos desenvolvidos em uma prospecção geofísica realizada no sítio arqueológico Lago da Lontra, em Penalva, Estado do Maranhão, com o objetivo de determinar padrões geofísicos anômalos relacionados a áreas de descarte de material cerâmico e de estruturas soterradas que representem vestígios de ocupações pretéritas.

FISIOGRAFIA E GEOLOGIA

O Maranhão está situado em uma grande área de transição entre ambientes equatoriais úmidos e áreas gradualmente mais secas, apresentando segmentos morfoclimáticos característicos desse processo de transição. O Estado do Maranhão possui um litoral de 640 km entre a foz do Gurupi e o Delta do Parnaíba. Essa longa faixa litorânea é classificada como uma área de planícies flúvio-marinhas ou costeiras que, por sua vez, divide-se em dois subsetores distintos, cujo limite é o golfão maranhense e a própria São Luís: o ocidental com predominância de manguezais, denominado costa de rios, com reentrâncias, baías, ilhas e pontas; e o segmento oriental com acumulação de grandes manchas de sedimentos arenosos, conjunto de dunas conhecidas como lençóis maranhenses, fruto da ação eólica e da devolução de sedimentos carregados para a costa pelos rios da região (Ab'Sáber, 2001; Rios, 2005).

O golfão maranhense, que abrange São Luís, com 831,7 km², entre a Baía de São Marcos e a Baía de São José, além da Ilha dos Caranguejos (40 x 11 km de extensão), se caracteriza por estar inserido em uma planície flúvio-marinha constituída por estuários afogados dos rios Mearim, Itapecuru e Munim, moldados a milhões de anos e configurados pela ingressão marinha holocênica (Espírito Santo, 2006).

O prolongamento das características geomorfológicas e ambientais desde o estuário amazônico e a convergência das bacias hidrográficas do Itapecuru, Mearim, Pindaré e Munim para o golfão interligam diferentes domínios paisagísticos e ecossistemas (amazônicos, cerrados, cocais, etc.) o que qualifica a região como cenário estratégico para o assentamento de populações pretéritas (Espírito Santo, 2006).

Geologicamente, a Baixada Maranhense é constituída por rochas sedimentares, decorrentes da erosão de áreas cratônicas. As formações geológicas que compreendem a área de estudo são:

- Formação Itapecuru: ocupa a metade do território do estado, sendo constituída de arenitos finos, avermelhados e róseos, cinza, geralmente com estratificação horizontal (Maranhão, 2002);
- Grupo Barreiras: formado por conglomerados, cascalhos, areias, siltes e argilas de cores variadas de coloração avermelhada, creme amarelado, com granulação variando de fina e média, a matriz é argilosa caulinita, com cimento argila-ferruginosa, às vezes silicoso. Os sedimentos da Formação Barreiras são mal selecionados, pouco classificados e compactados, de fácil erosão, ou seja, desmoronam com muita facilidade (Maranhão, 2002).

Também são encontrados sedimentos inconsolidados que ocorrem na região preenchendo as partes topográficas mais baixas e planas. De origem fluvial e lacustre (Holocênico muito recente), sendo representado pelos depósitos aluvionares nas áreas de Planícies Flúvio-Marinhas periodicamente inundáveis, estuários e mangues (Maranhão, 2002; Figura 1).

CONTEXTO GEOHISTÓRICO

Durante o Quaternário, a porção norte do Maranhão, no entorno do golfão maranhense, passou por grande reestruturação paisagística e ecossistêmica em função dos processos neotectônicos, flutuações eustáticas e instabilidades climáticas. A área, de transição entre as bacias sedimentares do Parnaíba e São Luís, modelou-se em ambiente de pré-chapadas interiores a um complexo sistema de colmatagem flúvio-marinha (Ab'Sáber, 2006).

O soerguimento da faixa costeira propiciou a gênese na formação dos lagos durante o Pleistoceno, tornando-se a região receptora de sedimentos carregados pelos rios Pindaré, Grajaú e Mearim e das vertentes dos tabuleiros costeiros, configurando os ambientes de sedimentação que são as bacias lacustres. As unidades de paisagem características dessa região são: lagos, campos inundáveis, campos não inundáveis, aterrados, tesos inundáveis e terra firme (Dias, 2005).

No início do século XIX moradores da baixada e viajantes que passaram pela região, área da planície flúvio-marinha caracterizada por rios perenes e um mosaico de lagos e campos inundáveis, observaram e descreveram restos construtivos, esteios de diferentes dimensões fixados em “croas”, associados a grande quantidade de fragmentos cerâmicos, líticos e restos alimentares, que afloravam nas margens ou nos “tesos” dos lagos nos períodos de estiagem mais prolongados (Prous, 1992; Figura 2).

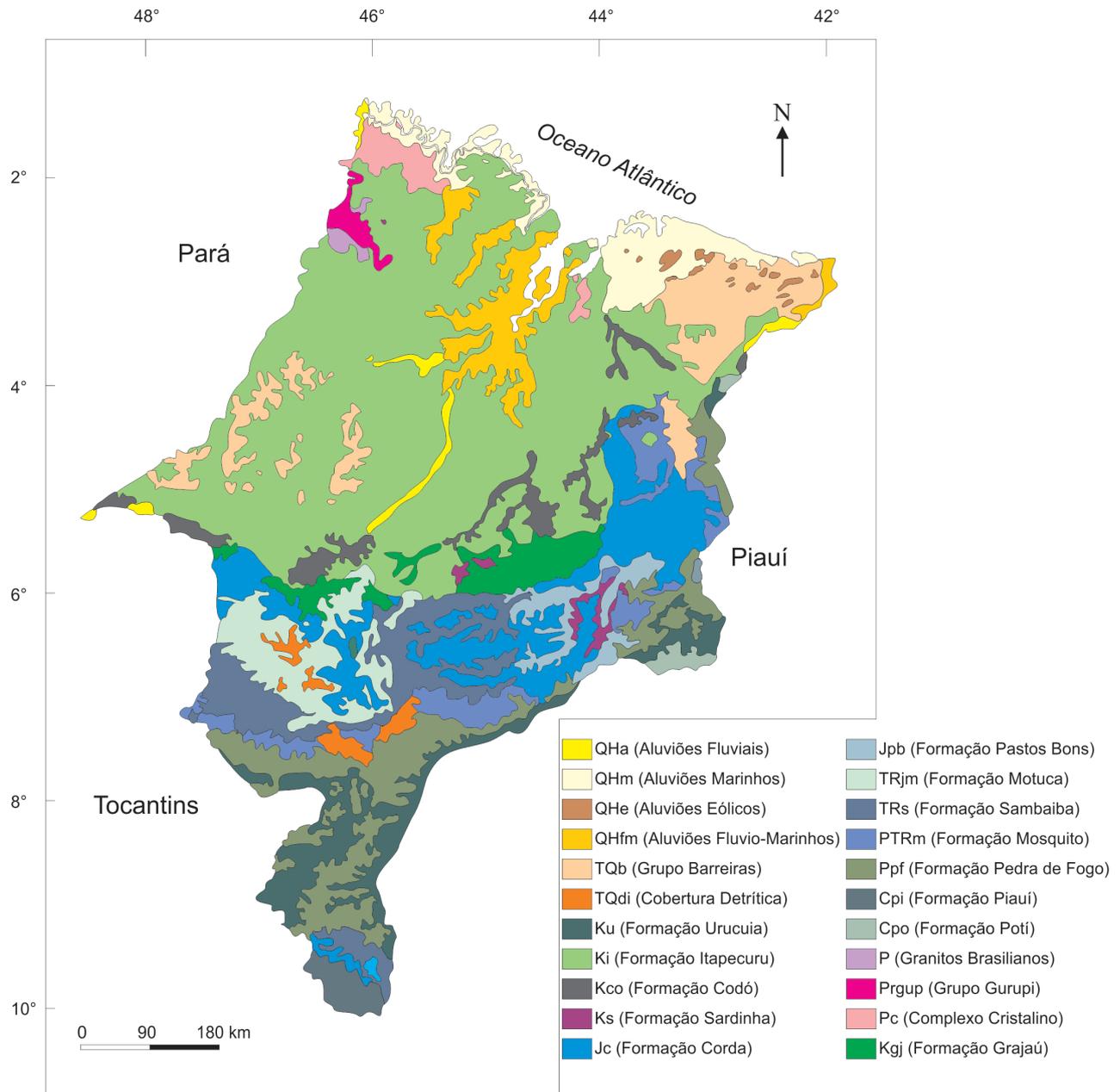
Reflexões mais recentes sobre a importância de tais assentamentos apontam a necessidade de estudos locais mais conclusivos. Esses remanescentes de habitações construídas sobre esteios são considerados totalmente originais dentro do quadro atual da arqueologia brasileira (Prous, 1992; Figura 3).

O município de Penalva foi ocupado em tempos pré-colombianos por tribos neolíticas lacustres construtoras de aldeias sobre palafitas. Os vestígios dessas aldeias (milhares de esteios) recebem o nome de estearias. A principal estearia, localizada no lago Cajari (enseada do Quebra-Coco) era uma autêntica cidade lacustre com mais de 2 km² de extensão e com uma população considerável (Balby, 1985).

A partir de 1919 o historiador, antropólogo e pesquisador do Museu Nacional, Raimundo Lopes, elaborou as primeiras hipóteses sobre essas ocupações, atribuindo sua vinculação a grupos amazônicos tardios que se deslocaram até o limite ocidental de ambiente de floresta equatorial úmida. Durante dez anos Lopes investigou a área da Baixada e localizou as “estearias” do Lago Cajari, no município de Penalva, do Encantado,

no município de Pinheiro, e outras ocorrências no rio Turiaçu, no município de Santa Helena (Caldarelli e Leite Filho, 2003).

Os ambientes da região, incluindo os campos, rios e lagos, foram percorridos e com base nas informações colhidas junto às populações regionais foram então identificados os primeiros locais de interesse arqueológico e foi recolhida uma diversificada coleção de artefatos



Fonte: adaptado de Maranhão (2002).

Figura 1. Mapa geológico do Maranhão.

e fragmentos, destacando-se uma cerâmica variada com decoração antropomorfa e em grande parte zoomorfa, vasilhas com pintura vermelha interna, pequenas tigelas em formato de meia calota, muiraquitãs, cunhas e lâminas de machado, tortuais, pesos de redes, assadores circulares e uma grande quantidade de fragmentos de cerâmica utilitária, muitas com marcas de fogo (Figura 4).

Essa coleção se encontra no Museu Nacional da Quinta da Boa Vista, no Rio de Janeiro, e no Centro de Pesquisa de História Natural e Arqueologia do Maranhão, sendo a base para a elaboração de uma série de artigos que fundamentaram a concepção dos modelos explicativos sobre os grupos pré-coloniais que se estabeleceram nesses ambientes, levando à construção das abordagens que possibilitaram a caracterização da então denominada “civilização lacustre do Brasil”, muito em voga no país até meados de 1950 (Lopes, 1916; 1924; 1970).

Em 1971, com fundamentação nesses dados preliminares foi efetuado um trabalho de campo nas proximidades da cidade de Penalva, no Lago Cajari, sob o patrocínio do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional e do Museu Paraense Emílio Goeldi com a coordenação do arqueólogo Mário F. Simões. Foram executados registros e prospecções em áreas alagadas, de pouca profundidade, onde se realizou a coleta de material depositado no leito de lama entre os esteios nos sítios Cacara e Igarapé do Bahiano, ambos anteriormente descritos e visitados por Raimundo Lopes (Corrêa, 1991).

Tais esteios, distante entre si cerca de dois metros, foram intencionalmente fixados nesses ambientes e seriam a base de sustentação do antigo piso das moradias, provavelmente de grupos que tinham a sua dieta alimentar baseada na pesca e coleta de recursos lacustres, caça de pequenos animais e agricultura incipiente nos terraços fluviais ou áreas ribeirinhas (Figura 5).



Figura 2. Fotografia evidenciando uma estearia no sítio arqueológico Lago Cajari no início do período chuvoso, em 09/03/2012.



Figura 3. Fotografia evidenciando uma estearia no sítio arqueológico Lago Cajari no início do período de estiagem, em 06/12/2011.



Figura 4. Fotografias evidenciando peças cerâmicas encontradas em estearias do Maranhão. (A) Cabeça antropomorfa (Rio Turi, Santa Helena). (B) Aplique zoomorfo (Estearia do Encantado). (C) Tigela com aplique zoomorfo (Estearia do Caboclo, Rio Turi).

O material coletado tem as mesmas características já descritas anteriormente, sendo a cerâmica classificada em três tipos simples e dois decorados, apresentando, nas peças mais elaboradas, adornos modelados aplicados à borda ou ao corpo dos vasos. Considerando a análise dos achados foi estabelecida a fase Cajari, obtendo-se a datação, por carbono 14, de 1385 ± 95 anos, a partir de um fragmento dos troncos de sustentação de pau d'arco (*Tabebuia dasp*). O acervo proveniente dessas intervenções se encontra no Museu Paraense Emílio Goeldi (Corrêa, 1991).

Atualmente são conhecidos 12 sítios que, apesar de dispersos em uma região de 40 mil km de bacias lacustres, geraram dados bastante limitados até o momento. Alguns modelos explicativos podem ser sugeridos a partir de hipóteses levantadas no passado e em tempos mais recentes sobre os padrões de assentamento, as práticas econômicas e culturais e o modo de vida observado pelas populações de então, embora informações sobre densidade populacional, mobilidade espacial e organização social, por exemplo, não possam ser inferidas (Caldarelli e Leite Filho, 2003).

Provavelmente eram grupos intrusivos na região, porém se desconhece se formavam um conjunto de aldeias autônomas ou se mantinham algum tipo de vinculação política; ou mesmo se foram contemporâneos ou os sítios tenham sido sequencialmente ocupados em diferentes espaços cronológicos. A hipótese mais plausível é que por questões de segurança tenham se estabelecido no interior dos lagos sobre as águas, em ocupações de caráter mais permanente, descartando-se, em princípio, a sazonalidade das mesmas, tendo em vista o trabalho empregado na construção dessas estruturas (Leite Filho e Leite, 2005).

No levantamento arqueológico preliminar antes do levantamento geofísico, a equipe liderada pelos arqueólogos Deusdedit Carneiro Leite Filho e Fernando Luis Tavares Marques realizou três escavações preliminares dentro do sítio, o que lhes permitiu o resgate de vários fragmentos cerâmicos (Figura 6).



Fonte: g1.globo.com/ma/noticia/2012/05/sitios-arqueologicos-do-maranhao.html

Figura 5. Modelo esquematizado das aldeias sobre palafitas.

MATERIAIS E MÉTODOS

O levantamento foi realizado com o objetivo de localizar feições associadas a fragmentos cerâmicos relacionados a soterramento, rituais ou adorno dos índios Guajajara que habitaram a região, utilizando a magnetometria e o GPR. A campanha geofísica ocorreu num período de três dias, divididos em duas etapas. A primeira etapa consistiu na coleta dos dados magnéticos, que foram dispostos de modo a formar uma malha quadrada de 2,5 m de lado, registrando o gradiente do campo magnético ao longo de 1.664 pontos em 2 dias, e na segunda etapa, após análise dos dados magnéticos, foram adquiridos 14 perfis de GPR para produzir um imageamento da subsuperfície e fornecer uma localização mais precisa dos alvos.

Foi verificada a vantajosa aplicação desses métodos geofísicos para avaliação do sítio arqueológico como uma metodologia de rápida aplicação e de custo mínimo, com natureza não destrutiva, que poupa tempo e custo pessoal, sendo recomendada sempre que possível.

MAGNETOMETRIA

Os dados magnéticos foram adquiridos com um magnetômetro de precessão de prótons, fabricado pela empresa GEOMETRICS, modelo G-856 AX Memory-Mag, cuja técnica empregada foi o gradiente magnético vertical (Figura 7). Como o sítio têm dimensões de 80 m na direção W-E e 130 m na direção S-N, foram registradas as medidas em intervalos de 2,5 m sobre linhas espaçadas de 80 m de comprimento e orientadas na direção W-E, totalizando 53 linhas e cobrindo uma área retangular de 10.400 m² cujas coordenadas estão no mapa magnético.

O mapa magnético foi gerado com o *software Surfer 10* (Golden Software Inc., USA), sendo que o intervalo de contorno utilizado foi de 0,6 nT, pois não houve processamento dos dados, apenas a interpolação dos dados adquiridos no campo. Tais anomalias contrastam intercaladamente em regiões negativas, variando de 0 a -33 nT, com regiões positivas, variando de 0 a 11 nT, que podem estar relacionadas a material cerâmico.

Ground penetrating radar

Para adquirir os dados de GPR foi utilizado o equipamento TerraSIRch SIR (Subsurface Interface Radar) System-3000, fabricado pela *Geophysical Survey Systems Inc* (GSSI) (Geophysical Survey Systems, Inc., 2003), operando em modo tempo e contínuo, e uma antena de 400 MHz. Sabe-se que as antenas de maior frequência são mais apropriadas para identificação de fragmentos cerâmicos, contudo, a antena de maior frequência disponível era a de 400 MHz. Em contra

partida, essa antena é capaz de investigar profundidades maiores (Figura 8).

A antena de 400 MHz apresentou a melhor resolução disponível para o imageamento de alvos que apresentam dimensões acima do comprimento de onda da frequência central (em torno de 21 cm). No caso desta pesquisa, alguns alvos apresentaram dimensões da ordem desse comprimento de onda, sendo, portanto, representados por pontos difratores nos radargramas (Daniels, 2004).

Os dados de GPR foram coletados após a análise das anomalias magnéticas evidenciadas no mapa magnético do gradiente vertical, de tal maneira que o comprimento dos perfis foi escolhido de modo a recobrir as posições das anomalias magnéticas, visando corroborá-las e imagear a sub-superfície. Idealmente, seria preferível realizar medidas de GPR ao longo de toda a área com espaçamento entre perfis de ao menos 0,5 m, gerando uma malha para uma análise 3D mais detalhada, contudo, o tempo exíguo e a possibilidade de ocorrência de chuvas limitaram o uso do GPR. A investigação foi feita em 14 perfis ao longo das linhas,

com marcações em intervalos de 10 m e janela temporal de tempo de 50 ns para os perfis que estão na direção S-N e 60 ns para os que estão na direção W-E, 512 amostras por traço, 64 *scans* por segundo, taxa de transmissão de 100 KHz, velocidade de levantamento de 0,5 m/s e formato de registro em 16 bits (dados no formato *.DZT).

O processamento dos dados de GPR foi desenvolvido no *software ReflexW*, versão 7.0. Foi aplicado um processamento básico visando melhorar os radargramas, que inicialmente consistiu na análise das frequências presentes através da obtenção do espectro de amplitudes, que define frequências de corte para a aplicação de filtros de passa banda para remoção dos ruídos de alta e baixa frequência nos sinais adquiridos.

Na etapa subsequente foi realizado o pré-processamento, consistindo na edição, reamostragem espacial e interpolação dos traços. Durante essa etapa foram removidos os traços duplicados, que surgem quando a antena permanece em um mesmo local durante a aquisição (varredura em um mesmo ponto). Nessa etapa de processamento foram corrigidos,



Figura 6. Fotografia evidenciando uma escavação arqueológica no sítio Lago da Lontra, realizada em Cajari no início do período de estiagem, em 13/12/2011.



Figura 7. Fotografia evidenciando a aquisição de dados magnéticos com um gradiômetro G-856, na área do sítio Lago da Lontra.



Figura 8. Fotografia evidenciando a aquisição dos dados de radar de penetração no solo com o sistema SIR-3000 acoplado a uma antena de 400 MHz.

ainda, a amostragem espacial dos traços (incremento do traço), eliminando os efeitos ocasionados na velocidade de levantamento (velocidade com que o operador desloca a antena), e o comprimento do perfil.

Após a edição inicial de traços é necessário colocar os dados nos seus tamanhos reais para que os mesmos fiquem com suas dimensões 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).

As etapas de processamento foram as seguintes:

1. correção estática ou ajuste do tempo zero (*offset*), que ajusta o tempo inicial de registro da primeira onda a chegar à antena receptora, denominada de onda aérea (posição da superfície do terreno);
2. aplicação de filtro *subtract-mean* (*dewow*) para remoção dos ruídos de baixa frequência, gerados pela indução eletromagnética que ocorre entre as antenas transmissora e receptora, devido às grandes amplitudes das ondas diretas no ar e no solo. Para esse propósito, o intervalo da janela de tempo deve ser ajustado para aproximadamente o tamanho do pulso principal (*wavelet*) através da onda direta, que pode ser visualizada em *wiggle window* (Stranneby, 2001; Messinger, 2004);
3. filtro *running average*, com o propósito de suavizar ruídos sobre os refletores e melhorar a visualização da continuidade dos eventos, observando que o aumento do número de traços utilizados na média do filtro faz com que, algumas vezes, haja demasiada suavização dos refletores (Annan, 2001);
4. filtro *background removal*, cuja função é remover refletores contínuos, relacionados a interfaces geológicas, hidrogeológicas e pedológicas, ou ruídos que também podem ser gerados pela indução eletromagnética entre as antenas transmissora e receptora (Annan, 2001).

E por fim, foi aplicada a conversão tempo-profundidade, cuja técnica empregada para determinação da velocidade de propagação da onda eletromagnética foi o método de sobreposição de hipérboles tomadas como referência as hipérboles dos perfis 1, 4 e 5, cuja velocidade ajustada foi de 0,085 m/ns. As hipérboles são de pequenas dimensões e observáveis em alguns perfis (Figura 9).

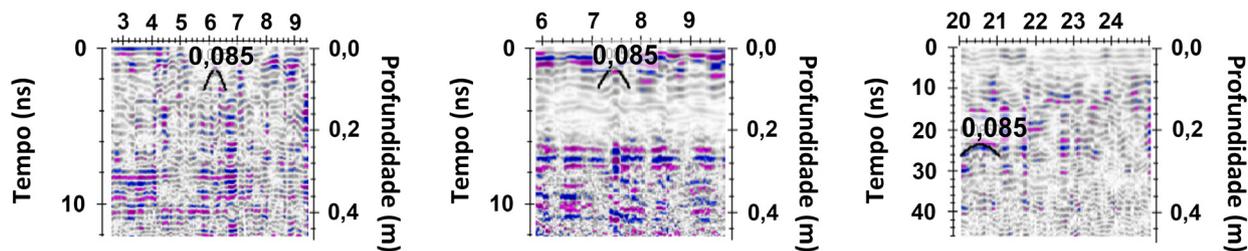


Figura 9. Hipérboles de difrações usadas como modelo de velocidade nos perfis 1, 4 e 5, respectivamente.

RESULTADOS

Magnetometria

O mapa do gradiente vertical do campo magnético total mostra uma série de anomalias variando de -33 a 11 nT, que se relacionam com material cerâmico. Com base nas anomalias magnéticas observadas foram sugeridas oito áreas para escavações arqueológicas, marcadas como: [A], [B], [C], [D], [E], [F], [G] e [H] (Figura 10).

As seguintes anomalias foram detectadas e recomendadas para escavações arqueológicas: [A] forte anomalia positiva com variação entre 9 e 11 nT, que pode estar relacionada com o material cerâmico procurado; [B] forte anomalia negativa com pico variando entre 0 e -33 nT; [C] anomalia positiva cujas variações estão entre 1 e 4 nT; [D] anomalia com picos positivos entre 0 e 3 nT; [E] anomalia positiva alongada; [F] anomalia alongada com picos positivos; [G] anomalia positiva; [H] anomalia positiva. No entanto, por ser um sítio estuarino, no período chuvoso o sítio ficou submerso e só foi possível realizar as escavações [A], [B], [C], [D] e [E] (Tabela 1).

As anomalias magnéticas foram confirmadas através de escavações que evidenciaram diferentes tipos de materiais (Figura 11). Na escavação realizada sobre a anomalia magnética [A] ocorreu a maior concentração de material arqueológico, com a camada de argila chegando a aproximadamente 0,3 m de espessura. Nessa escavação, cujas dimensões são 1 x 3 m, foram encontrados um esteio de madeira, muitos fragmentos cerâmicos (maior elipse branca tracejada), vasto material vegetal (carvão, menor elipse branca tracejada), que foi esse último foi coletado e enviado para datação.

As demais escavações realizadas sobre as anomalias magnéticas [B], [D] e [E] têm área de 2 m² cada e apresentaram o mesmo padrão onde percebemos a presença de carvão associado a uma fina camada, de aproximadamente 0,2 m de espessura, argilosa e ondulada. E por fim, a escavação realizada sobre a anomalia magnética [C] continuou a registrar ondulações e descontinuidades na camada de argila, bem como a presença de diversos fragmentos cerâmicos (bordas, base, alças de louças) e bastante material vegetal (carvão).

Ground penetrating radar

Na análise e interpretação dos radargramas obtidos em cada um dos perfis, procurou-se localizar contrastes de zonas onde há uma descontinuidade no acamamento das camadas, na tentativa de localizar possíveis áreas de descarte de material. Dentre os perfis de GPR realizados, destacam-se os perfis 4, 7, 10, 11 e 13, os quais apresentaram zonas anômalas relacionadas às anomalias do mapa magnético.

O perfil 4 se estende por 30 m na direção N-S. No radargrama é possível notar duas áreas anômalas. Na primeira área, localizada entre as posições 46 e 47 m, percebe-se a presença de um refletor de alta amplitude, já na segunda nota-se uma anomalia do tipo descontinuidade das camadas entre as posições 56 e 57 m, que corresponde ao local onde foi detectada a anomalia magnética [A], cujas escavações evidenciaram fragmentos de cerâmica, carvão e um esteio de madeira (Figura 12).

O perfil 11, executado sobre a anomalia magnética [C] (Figura 13), apresentou uma anomalia de alta amplitude

Tabela 1. Posição e amplitude das anomalias magnéticas identificadas no Sítio Lago da Lontra.

Anomalias	Linha (m)	Estação (m)	Amplitude (nT)
[A]	9537619	465731	9 – 11
[B]	9537674	465726	0 – -33
[C]	9537641	465721	1 – 4
[D]	9537616	465753	0 – 3
[E]	9537589	465701	1 – 5
[F]	9537606	465731	3 – 7
[G]	9537591	465766	3 – 6
[H]	9537696	465751	1 – 9

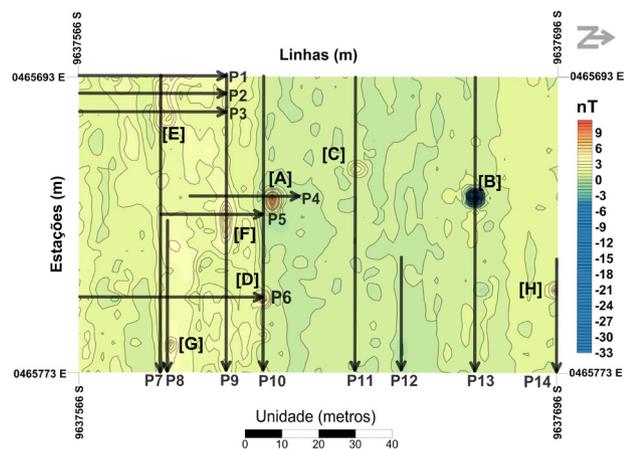


Figura 10. Mapa magnético do gradiente vertical/campo total da área do sítio Lago da Lontra juntamente com o posicionamento dos perfis de radar de penetração no solo.



Figura 11. Fotografias das escavações arqueológicas desenvolvidas sob anomalias magnéticas [A], [B], [C] e [D], respectivamente.

centralizada na posição 30 m, coincidindo com o pico da anomalia magnética. Nessa seção de GPR também é possível perceber uma área com leve descontinuidade entre as posições de 64 a 70 m, que se estende de 10 a 30 cm de profundidade.

CONCLUSÕES

A pesquisa pioneira usando ferramentas geofísicas no sítio arqueológico Lago da Lontra foi satisfatória na localização e prospecção de material arqueológico na área de

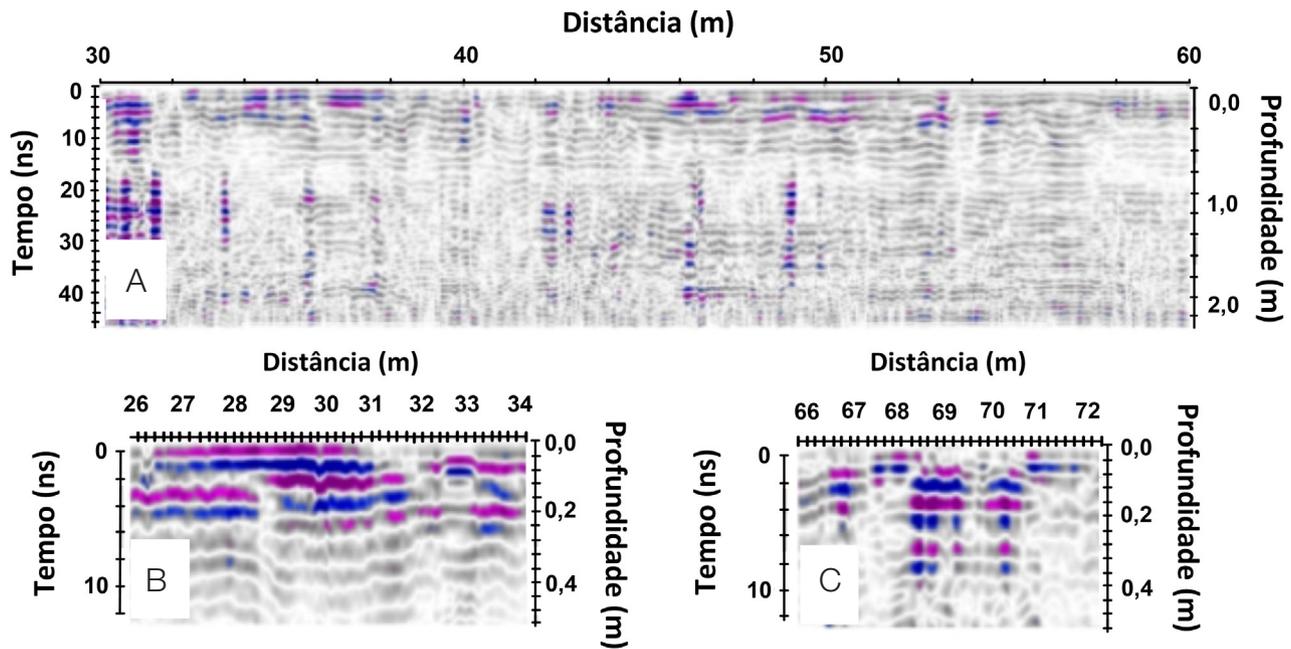


Figura 12. Radargrama do perfil 7. (A) Com anomalias de alta amplitude referente a um esteio. (B) Descontinuidade da camada. (C) Sob anomalia magnética.

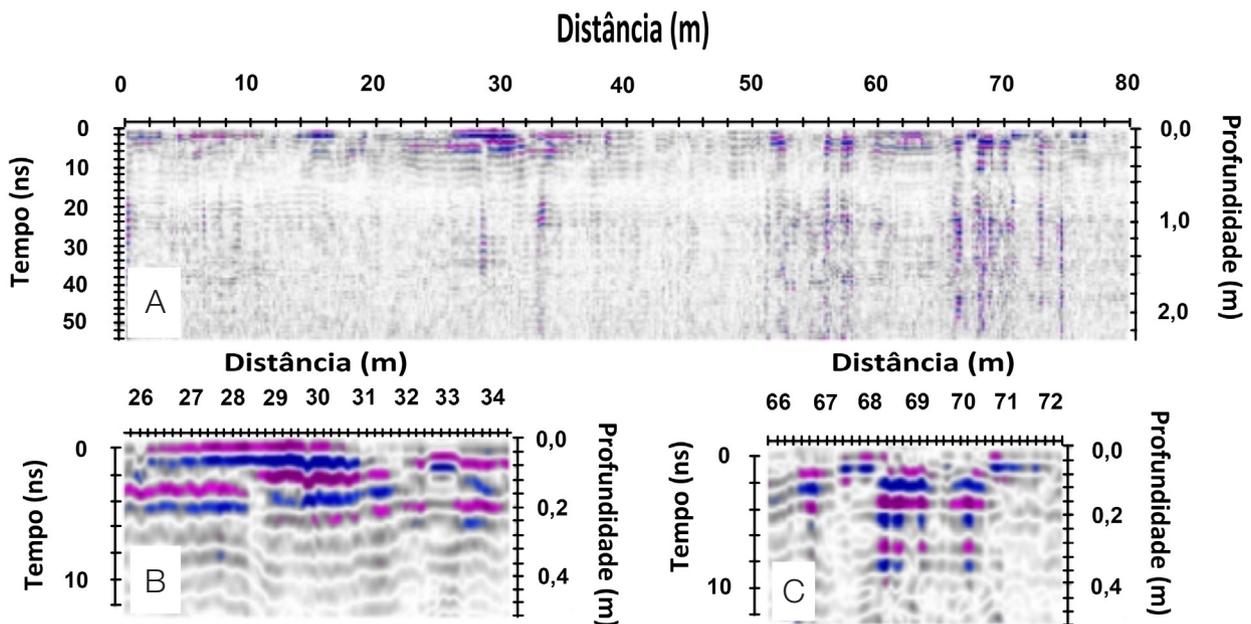


Figura 13. Radargrama do perfil 13. (A) Com anomalias de alta amplitude e descontinuidades. (B) Pico da anomalia magnética [C]. (C) Descontinuidades nas camadas.

estudo, representando a importância da geofísica nesse tipo de levantamento.

Os resultados apresentados neste trabalho permitiram verificar e avaliar a correlação entre os dados magnéticos e os perfis de GPR para indicar os possíveis locais de escavações arqueológicas.

O método magnético proporcionou bons resultados, pois conseguiu, através das anomalias magnéticas detectadas, indicar os locais mais promissores para escavações arqueológicas. Considera-se que em condições adequadas esse é o método geofísico mais indicado para a realização de um estudo inicial em um sítio arqueológico devido à facilidade de operação e boa resposta aos alvos arqueológicos que neste trabalho eram constituídos de cerâmica, esteios e carvão vegetal.

A boa resolução obtida com o GPR, com a antena de 400 MHz, permitiu observar as anomalias relacionadas ao material cerâmico, bem como as descontinuidades e ondulações nas camadas, no entanto necessita de informações preliminares para a escolha adequada das linhas de levantamento.

A correlação dos resultados do levantamento magnético e dos perfis de GPR facilitou consideravelmente a localização dos locais indicados para escavação arqueológica, reduzindo a probabilidade de erro, o que seria possível fazendo uso de apenas um método.

O material encontrado está sob a guarda do Centro de Pesquisa de História Natural e Arqueológica do Maranhão para análise e datação dos povos antigos que habitaram aquela região.

É importante salientar que a resposta geofísica, em alguns casos, é ambígua, por diversos fatores. Daí a cooperação entre geofísicos e arqueólogos na tentativa de minimizar tais ambiguidades na escolha dos locais para escavação arqueológica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo ao primeiro autor para desenvolvimento desta pesquisa e ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA) pela estrutura, suporte e logística proporcionada à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Ab'Sáber, A. N. (2001). *O Litoral do Brasil*. São Paulo: Metalivros.
- Ab'Sáber, A. N. (2006). *Brasil: paisagens de exceção: o litoral e o pantanal mato grossense: patrimônios básicos*. São Paulo: Ateliê Editorial.
- Alves, J., Lourenço, S. (1981). Métodos geofísicos aplicados à arqueologia no Estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Geologia*, 26, 1-52.
- Annan, A. P. (2002). *Ground penetrating radar*. Workshop notes: Sensor and Software Inc., Mississauga, Ontário, Canadá.
- Aragão, R. C. (2006). *Metodologia geofísica aplicada à pesquisa de salvamento arqueológico nos sítios Bittencourt, Jambuaçu e Jaburu, Estado do Pará*. Dissertação (Mestrado). Belém: Centro de Geociências – UFPA.
- Balby, R. (1985). *A Cultura Neolítica de Penalva*. São Luís: Belgraf-Belim Artes Gráficas e Editora LTDA.
- Barradas, J. A., Schaan, D. P., Luiz, J. G. (1999). Magnetic and GPR Survey to Identify Archaeological Features on Cacoal Site, Anajás River, Marajó Island, Pará, Brazil. *XI Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*. Rio de Janeiro: SBGf.
- Bevan, B.W., Roosevelt, A.C. (2003). Geophysical exploration of Guajará, a prehistoric earth mound in Brazil. *Geoarchaeology*, 18(3), 287-331.
- Caldarelli, S. B., Leite Filho, D.C. (2003). As primeiras datações de assentamentos de caçadores coletores de interior no Maranhão. *XII CONGRESSO DA SOCIEDADE DE ARQUEOLOGIA BRASILEIRA*. São Paulo: SAB.
- Corrêa, M. V. M. (1991). Arqueologia e comunidade: uma experiência a ser reproduzida. *VI Reunião Científica da Sociedade da Arqueologia Brasileira*. Rio de Janeiro: SAB.
- Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar* (2nd ed.). London. The Institution of Electrical Engineers.
- Dias, L. J. B. S. (2005). Geologia, geomorfologia e unidades de paisagem da baixada maranhense: uma revisão de concepções aplicadas ao planejamento regional. *XI Simpósio Brasileiro de Geografia e Física Aplicada*. São Paulo: USP.
- Espírito Santo, J. M. (2006). *São Luís: uma leitura da cidade*. São Luís: Instituto de Pesquisa e Planificação da cidade.
- GSSI. (2003) RADAN for Windows. User's Manual. Version 5.0. Geophysical Survey Systems, Inc., North Salem, NH.

- Leite Filho, D. C. L., Leite, E. G. (2005). Ocupação pré-histórica da ilha de São Luís: a ocorrência de grupos ceramistas proto-Tupi. *Boletim da Comissão Maranhense de Folclore*, 32, 12-15.
- Lopes, R. (1916). *O Torrão Maranhense*. Rio de Janeiro: Typ do Jornal do Commercio.
- Lopes, R. (1924). A civilização lacustre no Brasil. *Boletim do Museu Nacional*, 1(2), 87-109.
- Lopes, R. (1970). *Uma Região Tropical*. Rio de Janeiro: Ed Fon-Fon e Seleta.
- Luiz, J. G., Silva, L. M. C. (1995). *Geofísica de prospecção*. Belém: Universidade Federal do Pará.
- Maranhão. (2002). *Atlas do Maranhão*. São Luís: Labogeo.
- Melo, M. S. (2007). *Geofísica aplicada à arqueologia: investigação no sítio histórico engenho Murucutu, em Belém, Pará*. Dissertação (Mestrado). Belém: Centro de Geociências – UFPA.
- Messinger, J. (2004). Effective automatic picking of travel time data with high precision. *X International Conference on Ground Penetrating Radar*. The Netherlands.
- Prous, A. (1992). *Arqueologia Brasileira*. Brasília: Editora UNB.
- Rios, L. (2005). *Geografia do Maranhão*. São Luís: Central dos livros.
- Roosevelt, A. C. (1991). *Moundbuilders of the Amazon: geophysical archaeology on Marajo Island, Brazil*. San Diego: Academic Press.
- Sandmeier, K. J. (1998). *Manual do software ReflexW, version 4.2*. Karlsruhe.
- Stranneby, D. (2001). *Digital Signal Processing: DSP and Applications*. An imprint of Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford.
- Yelf, R. (2004). Where is True Time Zero? *X International Conference on Ground Penetrating Radar*. The Netherlands.