



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

O Método GPR utilizado no monitoramento do nível freático e na definição da penetração da cunha salina na praia do Farol, Mosqueiro - Pa.

KAROLINA ALMEIDA CORREIA

Belém
2019

KAROLINA ALMEIDA CORREIA

O Método GPR utilizado no monitoramento do nível freático e na definição da penetração da cunha salina na praia do Farol, Mosqueiro - Pa.

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

Área de Concentração: Processamento e Interpretação de dados Geofísicos.

Linha de Pesquisa: Geofísica rasa.

Orientador: Prof. Dr Marcos Welby Correa Silva

Belém
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C824m Correia, Karolina
O Método GPR utilizado no monitoramento do nível freático e
na definição da penetração da cunha salina na praia do Farol,
Mosqueiro - Pa. / Karolina Correia. — 2019.
49 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Geofísica,
Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém,
2019.

1. GPR. 2. nível freático. 3. cunha salina . 4. praia estuarina.
I. Título.

CDD 550

KAROLINA ALMEIDA CORREIA

O Método GPR utilizado no monitoramento do nível freático e
na definição da penetração da cunha salina na praia do Farol,
Mosqueiro - Pa.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Geofísica da Universidade Federal do Pará para ob-
tenção do título de Mestre em Geofísica.

Data de aprovação: 1 de Agosto de 2019

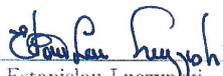
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva (Orientador)
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Saulo Siqueira Marrins
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro



Prof. Dr. Estanislau Luczynski
Universidade Federal do Pará

Ao meu amor, minha força diária, Luna.

AGRADECIMENTOS

A Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisa (FAPESPA), que fomentou financeiramente o desenvolvimento do projeto “Permeabilidade de praias arenosas amazônicas a eventuais derrames de derivados de hidrocarbonetos”.

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

Ao meu orientador Prof. Marcos Welby Correa Silva, pela compreensão, oportunidade, apoio e pelos valiosos ensinamentos tanto na Geofísica quanto na vida.

Ao Artur Gustavo (Gugu) e Ivson por todo conhecimento compartilhado e as risadas durante as viagens de campo.

Aos amigos do PROEM Jéssica, Tarciana, Alex, René, Karina, Jarold pelo apoio, pelas brincadeiras e pela ajuda com as disciplinas do mestrado.

A minha irmã Kamila, minha Tia Regi e a Tia Joana e ao Víncius por todo apoio e suporte, sem a ajuda de vocês, a missão de terminar este mestrado seria quase impossível.

Aos meus pais, Maria Cristina e Reginaldo que nunca deixaram de incentivar as minhas escolhas e minhas decisões com relação ao ingresso na universidade.

RESUMO

A associação de dados de sondagens com registros obtidos através da utilização do Ground Penetrating Radar (GPR), levando em consideração a sazonalidade climática, na Praia do Farol (ilha de Mosqueiro/Belém-PA), revelou o comportamento do nível freático e o registro da penetração da cunha salina em subsuperfície nesse ambiente estuarino. A identificação do nível freático foi bastante clara, revelando uma transição entre zona não saturada e zona saturada bem definida. Os perfis de GPR mostraram que o topo do nível freático é registrado como um refletor horizontal forte, mergulhando em direção ao mar. O topo do nível freático na zona de pós-praia está localizado em aproximadamente 1 metro de profundidade, no período chuvoso (março), tornando-se mais profundo na zona intermarés. No período de estiagem (novembro), o topo da superfície do nível sofre rebaixamento, variando de 1,9 metros na zona supramarés, a e 2 metros na zona intermarés. A umidade do solo e, sobretudo, a presença de sal nos sedimentos praias tiveram forte influência nos sinais da reflexão, mudando a constante dielétrica dos sedimentos e, conseqüentemente, criando zonas de atenuação de sinais, permitindo, dessa forma, mapear a cunha salina em subsuperfície durante o período de estiagem. Contudo, é recomendado um estudo geofísico utilizando outros métodos, buscando melhores resultados do ponto de vista hidrogeológico.

Palavras-chaves: GPR. cunha salina. praia estuarina. nível freático.

ABSTRACT

The association of survey data with records obtained through the use of the Ground Penetrating Radar (GPR), taking into account the climatic seasonality, in Praia do Farol (Mosqueiro Island / Belém-PA), revealed the behavior of the water table and the record of the penetration of the salt wedge into subsurface in this estuarine environment. The identification of the water table was very clear, revealing a transition between unsaturated zone and well-defined saturated zone. The GPR profiles show that the level of the top of the water table is registered as a strong horizontal reflector, diving towards the sea. The top of the water table in the post-beach zone is located approximately 1 meter deep in the rainy season (March), becoming deeper in the intertidal zone. During the dry season (November), the top of the surface of the sheet undergoes deepening, ranging from 1.9 meters in the supramarine zone to 2 meters in the intertidal zone. The soil moisture and, above all, the presence of salt in the beach sediments had a strong influence on the reflection signals, changing the dielectric constant of the sediments and, consequently, creating zones of signal attenuation, thus allowing mapping of the salt wedge in subsurface during the dry season. However, a geophysical study is recommended using other methods, seeking better results from a hydrogeological point of view.

Keywords: GPR. salt wedge. estuarine beach. groundwater.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Mapa de localização do perfil de GPR.	4
2.2	Sequências estratigráficas do Cenozóico (Paleogeno Superior – Neogeno) das plataformas Bragantina e Pará. A - Formação Pirabas e a parte inferior da Formação Barreiras; B - parte intermediária e superior da Formação Barreiras; C – Sedimentos Pós- Barreiras (Rossetti, 2001).	5
2.3	Perfil geológico representativo das três camadas que constituem as falésias da ilha de Mosqueiro e adjacências. A - camada arenosa; B - camada arenoargilosa a arenoconglomerática; C - camada argiloarenosa (Igreja et al., 1990).	7
2.4	Localização do Estuário do Rio Pará.	9
2.5	Índice de precipitação pluviométrica durante os períodos sazonais (Inmet 2015).	10
3.1	Esquema de transmissão do sinal de GPR em subsuperfície Adaptado de Santos (2010).	12
3.2	Radargrama (esquerda) gerado a partir de traços (direita), representando uma pseudo-imagem da subsuperfície.	13
4.1	Operações de Campo. A) Aparelho GPR utilizado nos levantamentos; B) Perfil de GPR realizado na praia do Farol.	18
4.2	Mensuração do nível do nível freático em poço de abastecimento mediante utilização do medidor eletrônico.	19
4.3	Localização dos testemunhos litológicos no setor supramaré e intermaré Fonte : FAPESPA (2017).	21
4.4	(A) Corte longitudinal dos testemunhos obtidos com <i>Vibracore</i> ; (B) Subamostragem de sedimentos em uma das calhas do testemunho.	21
5.1	Distribuição granulométrica, grau de seleção e morfoscopia em subsuperfície nos setores supramaré e intermaré da Praia do Farol (Mosqueiro), no mês de Fevereiro Fonte : FAPESPA (2017).	23
5.2	Distribuição granulométrica, grau de seleção e morfoscopia em subsuperfície no setor intermaré da Praia do Farol (Mosqueiro), no mês de Novembro Fonte : FAPESPA (2017).	24
5.3	Comportamento do nível freático em relação a topografia local em fevereiro de 2015, no período chuvoso.	25
5.4	Comportamento do nível freático em relação a topografia local em Junho de 2015, no período intermediário.	26

5.5	Comportamento do nível freático em relação a topografia local em setembro de 2015, no período seco.	27
5.6	Comportamento do nível freático em relação a topografia local em Novembro de 2015, no período seco.	28
5.7	Comportamento do nível freático em relação a topografia local em Março de 2016, no período seco.	29
5.8	Modelo Geológico baseado no dado direto obtido em campo.	30
5.9	Comparação entre os radargramas obtidos de maneira indireta (Modelagem) e direta (Levantamento de campo). A) Perfil Sintético obtido através da modelagem geofísica; B) Perfil adquirido em campo em setembro de 2015	31

LISTA DE TABELAS

3.1	Estimativa da profundidade máxima de penetração em função da frequência central das antenas Adaptada de Porsani (1999).	11
3.2	Condutividade elétrica (σ), velocidade (v) típicas de alguns materiais Adaptada de Davis and Annan (1989).	17
5.1	Propriedades físicas dos meios utilizadas na construção do modelo.	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	ÁREA DE ESTUDO	4
2.1	PRAIA DO FAROL	4
2.1.1	Localização da Área	4
2.1.2	Geologia da área	4
2.1.3	Hidrogeologia da área	7
2.1.3.1	Coberturas detríticas e aluvionares	7
2.1.3.2	Formação Barreiras	7
2.1.3.3	Formação Pirabas	8
2.1.4	Intrusão salina em ambientes estuarinos	8
2.1.5	Aspectos Climáticos	9
3	METODOLOGIA	11
3.1	GROUND PENETRATING RADAR (GPR)	11
3.1.1	Estudo dos Parâmetros Geométricos	13
3.1.2	Propagação das Ondas Eletromagnéticas	15
4	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	18
4.1	OPERAÇÕES DE CAMPO	18
4.2	PROCESSAMENTO DE DADOS	19
4.2.1	Coleta de sedimentos intermarés e supramaré	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
5.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA PRAIA DO FAROL	22
5.2	PERFIS DE CAMPO	24
5.3	MODELAGEM GEOFÍSICA	29
6	CONCLUSÕES	32
	REFERÊNCIAS	33
	APÊNDICE	37

1 INTRODUÇÃO

Os distritos litorâneos da região metropolitana de Belém-PA têm um alto tráfego de navios e possuem zonas portuárias com grande potencial a eventos envolvendo vazamento de derivados de hidrocarbonetos. Nesse contexto, o Ministério do Meio Ambiente definiu normas e medidas para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para desastres relacionados à petróleo e derivados na zona costeira e marinha, no intuito de prevenir e minimizar os impactos que o meio ambiente poderia sofrer com possíveis derramamentos de óleo.

A contaminação por derivados do petróleo em praias arenosas, que provavelmente irá atingir a zona freática, depende, dentre outros fatores, da permeabilidade do substrato, das propriedades granulométricas da areia e das características físicas do óleo (Davies, 1995).

Então a identificação da zona de capilaridade entre a região saturada e insaturada em subsuperfície é uma informação que corrobora com outros estudos envolvendo ensaio de permeabilidade de líquidos, que consiste em cronometrar quanto tempo um líquido (óleo diesel, gasolina) percola entre os grãos dos sedimentos, a análise granulométrica da zona costeira e a topografia da região, a partir da observação de todas essas informações, se um acidente envolvendo derrame de óleo na costa Amazônica acontecer medidas baseadas neste estudo podem ser tomadas para que o meio ambiente não seja tão afetado.

Uma das preocupações quanto a desastres com estes impactos seriam a contaminação de poços de água e do nível freático de famílias que habitam a área litorânea da região metropolitana de Belém. Ademais, nas áreas costeiras, a intrusão da cunha salina muitas vezes impossibilita a utilização da água subterrânea para consumo público, portanto há a necessidade de se determinar com precisão a interface da água doce/água salgada, com intuito de se preservar a qualidade desse recurso hídrico subterrâneo. Devido a esses riscos, o estudo e monitoramento do nível freático são de suma importância para que em caso de acidentes, as medidas necessárias sejam providenciadas pelos órgãos competentes.

A água subterrânea é a principal fonte de água potável na maioria dos países (Igbagara et al., 2016). Desta forma as populações residentes na costa dependem das águas subterrâneas costeiras para o abastecimento de água doce. Contudo o sal pode afetar adversamente a qualidade e quantidade deste recurso, resultado do processo da intrusão salina de forma natural. Este é considerado um dos mais extensos e importantes processos que degradam a qualidade da água, que é determinado através de valores de salinidade que caracterizam a água potável e a água usada em sistemas de irrigação, por níveis de salinidade (Hodlur et al., 2006; Demirel, 2004; Sivan et al., 2005; Narayan et al., 2007; Rejani et al., 2008; Martínez et al., 2009; Adeoti et al., 2010; Zarroca et al., 2011; Guha, 2010; Caroti et al., 2013; Kumar et al., 2016).

A prospecção geofísica da transição água doce-salgada vem sendo realizada com sucesso desde a década de 1950, mapeando a distribuição espacial da resistividade do subsolo. Zonas de águas salinas ou salobras podem ser detectadas em terra por sonda de profundidade geométrica porque a resistividade elétrica em massa de sedimentos é essencialmente determinado pela resistividade elétrica do fluido poroso, que depende da concentração de íons ou do teor de sal.

Dentre as técnicas de possível aplicação para este tipo de monitoramento destaca-se o radar de penetração de solo (GPR), técnica geofísica de alta resolução baseada na reflexão de ondas eletromagnéticas de altas frequências (10-1000 MHz). Some-se a isso o baixo custo operacional se torna uma ferramenta ideal para este tipo de estudo costeiro.

Rossetti (2001) utilizou o método GPR como ferramenta para caracterizar fácies e estratigrafia dos depósitos conhecidos informalmente como Sedimentos Pós-Barreiras, na região Bragantina no Estado do Pará, em que concluíram que a unidade correspondente aos Sedimentos Pós-Barreiras é mais variável faciologicamente do que inicialmente imaginado, incluindo depósitos eólicos (dunas costeiras), bem como depósitos de cordão litorâneo, planície de maré, canal e planície de maré lamosa. Sua análise se baseou na configuração das reflexões internas e a geometria destas reflexões nos radargramas.

da Silva and das Virgens Alves (2013) desenvolveu um estudo da subsuperfície rasa para investigar uma possível contaminação provocada por água salgada advinda de viveiros de camarão na Vila Caratateua, município de Curuçá, Pará. Uma das metodologias geofísicas eletromagnéticas utilizadas foi Radar de penetração do solo (GPR). Através dos dados de GPR identificou-se a presença de zonas atenuadas indicando a contaminação salina e refletores que indicaram os blocos lateríticos e o nível freático local. Os resultados obtidos da correlação entre os dados eletromagnéticos foi satisfatória para esse tipo de investigação.

Silva (2015) buscou a definição litoestratigráfica e geológica das unidades neógenas da Região do Salgado, utilizando como técnica o imageamento por GPR e correlacionando com dados sedimentológicos foi possível identificar litofácies, geometria de camadas e de estruturas de possível origem tectônica dos depósitos neógenos, carbonáticos e siliciclásticos relacionadas, respectivamente, às formações Pirabas e Barreiras, bem como sedimentos quaternários da unidade Pós-Barreiras, que constituem o preenchimento da Plataforma Bragantina.

Estes trabalhos mostram que a utilização do GPR como ferramenta para o imageamento de ambientes costeiros abre uma oportunidade de se adquirir informações de maneira ágil e com grande qualidade na definição de estruturas geológicas em ambiente sedimentar (Pereira et al., 2003).

Estudos sobre como o nível freático varia de acordo com ambientes também tem ser tornado de extrema importância não só na avaliação de dispersão de contaminantes, mas, também, na determinação de gradientes hidráulicos, direção de fluxo, identificação de

zonas de recarga e descarga e na interpretação de dados geoquímicos. O georadar se mostrou eficaz na detecção da zona do nível freático em tipos diferentes de regiões de levantamento. Em ambientes estuarinos, Lani et al. (2005) fizeram estudos sobre dinâmica do nível freático no delta do rio Doce, verificando a eficiência deste método na análise do comportamento da profundidade da zona freática ao longo de um canal de drenagem.

Sendo assim, o uso da tecnologia do georadar consegue delinear aproximadamente a zona de capilaridade em que se encontra o nível freático, ou seja, há uma faixa de transição entre o meio insaturado e o meio saturado com água doce e é este fenômeno que será verificado com os resultados apresentados neste trabalho. Em ambientes costeiros a análise conjunta de parâmetros geológicos e geofísicos vem sendo bastante utilizada devido ao alto grau de informação obtido a partir das interpretações correlacionadas. O GPR por sua vez é aplicado principalmente para a caracterização de ambientes deposicionais, pois com a análise de traços obtidas e observando a atenuação do sinal é possível definir e investigarníveis distintos de ambientes deposicionais (Leandro, 2018).

Investigações utilizando GPR já foram realizados para os mais variados fins em regiões de zonas praianas. Para investigações da espessura dos pacotes sedimentares, estruturas, migrações de linha de costas e monitoramento do nível freático (Bristow and Jol, 2003; Giraud et al., 2011).

Neste trabalho foi feito uma investigação geofísica utilizando o método GPR com o objetivo de monitorar e identificar a zona freática na praia do Farol (ambiente estuarino), além do estudo da possível entrada da cunha salina neste ambiente, que será feita a partir da correlação dos dados diretos adquiridos em campo e dados sintéticos gerados a partir de modelagem geofísica. O trabalho contribui para a compreensão de forma dinâmica da difusão de prováveis contaminações por hidrocarbonetos ao relacionar o ambiente em que ocorre a contaminação com as variações sazonais do nível freático.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 PRAIA DO FAROL

2.1.1 Localização da Área

A área de estudo corresponde a Praia do Farol, localizada na Ilha de Mosqueiro, no estuário do rio Pará pertencente a Zona Costeira Amazônica.

A Ilha de Mosqueiro (Figura 2.1) é um dos distritos da região metropolitana de Belém e está aproximadamente a 72 km do centro de Belém estando, portanto, na zona de influência direta e indireta de atividades portuárias. O acesso se dá pelas rodovias BR-316 e PA-391. Mosqueiro possui uma área em torno de 223 km^2 e é dividida em bairros. O levantamento de GPR realizado na região fica situado no Bairro do Farol.

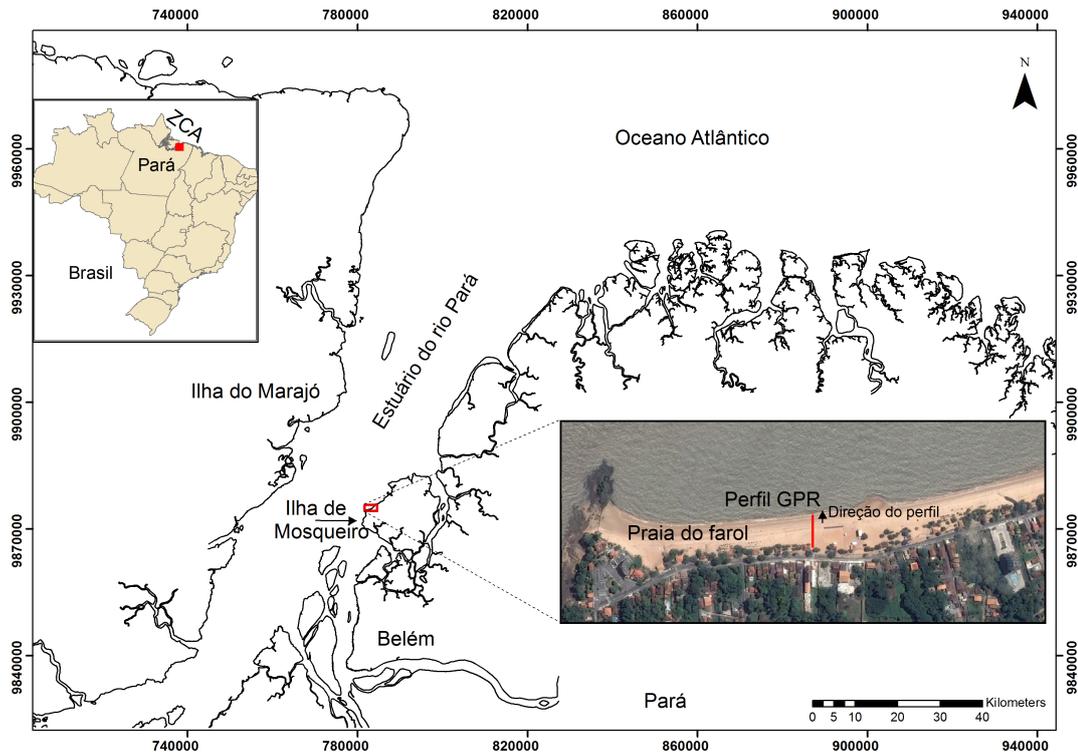


Figura 2.1: Mapa de localização do perfil de GPR.

2.1.2 Geologia da área

As unidades geológicas da região de Belém e adjacências são representadas pelas formações Pirabas, Barreiras e Sedimentos Pós-Barreiras. A deposição dessas unidades foi particularmente controlada pela formação e reativação de falhas normais e transcorrentes (Costa et al., 1996).

Com base em vários estudos, principalmente sedimentológicos e paleontológicos, Ros-

setti (2001) integralizou informações sobre estas formações e propôs uma divisão por sequência (Figura 2.2) para a região nordeste do Pará, que engloba a região de Belém. São elas:

- Sequência A: compreende a Formação Pirabas e a parte inferior da Formação Barreiras. A sequência representa a passagem gradual lateral e ascendente dos depósitos Pirabas para os sedimentos do Barreiras.
- Sequência B: corresponde a parte intermediária e superior da Formação Barreiras.
- Sequência C: representa os Sedimentos Pós-Barreiras.

ÉPOCA		UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	SEQÜÊNCIA DEPOSICIONAL
PLIOCENO - QUATERNÁRIO		Pós-Barreiras	C
MIOCENO	SUPERIOR	Paleossolo Laterítico	DS3
	MÉDIO	Formação Barreiras Superior - Médio	B
	INFERIOR	Formação Barreiras Inferior	DS 2
OLIGOCENO SUPERIOR	Formação Pirabas	A	
		Paleossolo Bauxítico - Laterítico	DS 1

Figura 2.2: Sequências estratigráficas do Cenozóico (Paleogeno Superior – Neogeno) das plataformas Bragantina e Pará. A - Formação Pirabas e a parte inferior da Formação Barreiras; B - parte intermediária e superior da Formação Barreiras; C – Sedimentos Pós-Barreiras (Rossetti, 2001).

Os sedimentos Pós-Barreiras na ilha de Mosqueiro, são constituídos por materiais arenosos, argiloarenosos a argiloconglomeráticos, e apresentam estrutura maciça (Costa et al., 1991). Apresentam espessuras, variando de 0,5 a 3 m, estão sotopostos à crosta ferruginosa, às vezes sobre saprólito mosqueado do perfil laterítico imaturo imposto na Formação Barreiras.

Quase toda a superfície da ilha é composta por latossolos derivados dos lateritos. Porém, porções de areia quartzosas brancas (podzóis) surgem em meio a estes solos, provenientes de lixiviação “in loco” dos mesmos (Sá, 1969).

Já a formação Barreiras são depósitos siliciclásticos constituídos por uma variedade de rochas onde se destacam arenitos maciços e estratificados, argilitos laminados a maciços, pelitos e conglomerados (Costa et al., 1993)

Foi bem descrita na orla noroeste da ilha de Mosqueiro em falésias Figura 2.3 nas praias do Paraíso, Grande e Baía do Sol (Borges, 1986). A descrição da base para o topo é a seguinte:

A base dos perfis, exposta apenas na baixa-mar, é formada por camada argiloarenosa esbranquiçada cinza e cinza escuro, com tons avermelhados, arroxeados e amarelados gerados pelo intemperismo.

Logo acima da base ocorre rocha laterizada representada por argilito goethizado, com espessura entre 20-50 cm. Este nível não é constante. Na praia da Baía do Sol entremeia a camada argiloarenosa.

Sobreposto ao argilito goethizado, em contato gradual e discordante, encontra-se arenito. Nesta camada ocorre estratificação cruzada de pequeno a médio porte, estrutura de escavação, espinha de peixe e preenchimento. Está fortemente laterizada, onde se destaca estrutura colunar e blocos métricos de concreções ferruginosas.

Por fim temos a formação Pirabas que se encontra exposta em alguns pontos da região Nordeste do Pará, foi depositada de forma discordante sobre rochas do Pre-Cambriano e também sobre rochas cretáceas da Formação Ipixuna.

Depositada durante o Mioceno Inferior, a Formação Pirabas é caracterizada por sedimentação carbonática contendo margas, biocalcarenito estratificados ou não estratificados, biocalcirudito, biocaciluditos, folhelhos negros e cinza esverdeados, além de enorme conteúdo fossilífero como conchas, foraminíferos e restos de vegetais com concreções de pirita (Nogueira et al., 1990)

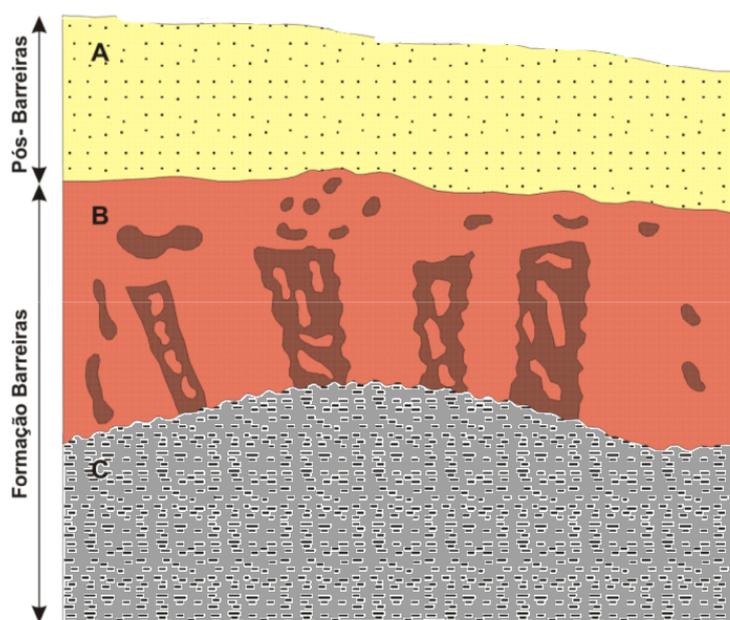


Figura 2.3: Perfil geológico representativo das três camadas que constituem as falésias da ilha de Mosqueiro e adjacências. A - camada arenosa; B - camada arenoargilosa a arenoconglomerática; C - camada argiloarenosa (Igreja et al., 1990).

2.1.3 Hidrogeologia da área

Essa é uma região sedimentar, onde a capacidade de armazenamento e circulação de água dependem da porosidade das rochas que compõem as formações Pirabas, Barreiras e coberturas detríticas lateríticas e aluvionares.

2.1.3.1 Coberturas detríticas e aluvionares

Esses sedimentos alúvio-colúvionares correspondem à unidade aquífera superior, formada por níveis argiloarenosos, inconsolidados, são considerados de potencial hidrogeológico fraco, como atestam as vazões conhecidas. Entretanto, na maioria das vezes, apresentam água de boa qualidade para consumo humano, podendo, em alguns casos, não ser potável devido ao teor excessivo de ferro. São aquíferos livres, cuja recarga se dá diretamente pela precipitação pluviométrica, enquanto que a descarga se efetiva através dos rios, fontes, evapotranspiração e poços de captação (OLIVEIRA, 2002).

2.1.3.2 Formação Barreiras

Este sistema hidrogeológico corresponde aos sedimentos do Grupo Barreiras, que tem expressões litológicas bastante heterogêneas, onde se incluem desde argilitos até arenitos grosseiros com níveis conglomeráticos. Esses litotipos se intercalam irregularmente possuindo uma natureza confinada a semi-livre, neste caso pela presença de camadas argilas

sucessivamente intercaladas nas areias da Silva and das Virgens Alves (2013). A recarga se dá por contribuição das camadas sobrepostas ou através da precipitação pluviométrica, nas áreas de afloramento dessa unidade.

2.1.3.3 Formação Pirabas

O terceiro domínio hidrogeológico corresponde à unidade Pirabas, formado por dois sistemas aquíferos do tipo multicamadas. O primeiro é caracterizado por sedimentos marinhos, fossilíferos, composto por argila calcífera cinza-esverdeada e leitos de calcário duro cinza-esbranquiçado, que se alternam sucessivamente com camadas de arenito calcífero, siltitos e areias (OLIVEIRA, 2002).

Quando diminuem os níveis de calcário e folhelho, aumentam as espessuras de areia. O potencial desse aquífero é moderado, contudo pode-se esperar boas vazões, principalmente nos arenitos mais grosseiros.

2.1.4 Intrusão salina em ambientes estuarinos

Segundo Pritchard (1956) estuário é classificado como sendo um corpo d'água costeiro semifechado com uma livre ligação com o oceano aberto, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental.

A abordagem física para os estuários é bastante complexo, afetado por vários fatores como a questão da circulação, processos de mistura e estratificação salina, que são características físicas importantes, dependem de vários fatores como a geometria (o que limita a sua dimensão), descarga fluvial, maré, salinidade, circulação oceânica adjacente e o regime de ventos (Pritchard, 1956).

Este tipo de ambiente são os mais propensos a ocorrer o processo de intrusão da cunha salina. A água salgada do mar é mais densa que a água doce do rio, devido à forte presença de sais dissolvidos a diferença entre as densidades, apesar de pequena, é suficiente para que haja uma tendência do fluido de maior densidade ficar embaixo da parcela de menor densidade.

O fenômeno de intrusão de cunha salina ocorre quando a vazão de água doce, que é injetada em um estuário por um rio, tende a lançar-se no oceano escoando sobre uma camada inferior de água salgada que se movimenta preferencialmente do oceano para o interior. A intensidade da vazão do rio se contrapõe a força da maré, e a ação dos ventos, o fluxo das marés intensifica a formação da cunha salina estendendo-se na direção do montante do rio.

No caso do estuário do rio Pará (Figura 2.4), a intrusão salina ocorre durante o período de baixa descarga (Baltazar et al., 2011; Bezerra et al., 2011). Neste caso, a presença de sal produz diferentes processos no estuário (por exemplo, processos de estratificação, advectivos e difusivos, etc.). A salinidade é um importante parâmetro em decisões tomadas

por gestões ambientais públicas e privadas. Além disso, sal variações de ingestão dentro de um estuário têm influência sobre a dinâmica e a hidrodinâmica dos sedimentos finos (ROSÁRIO et al., 2016).

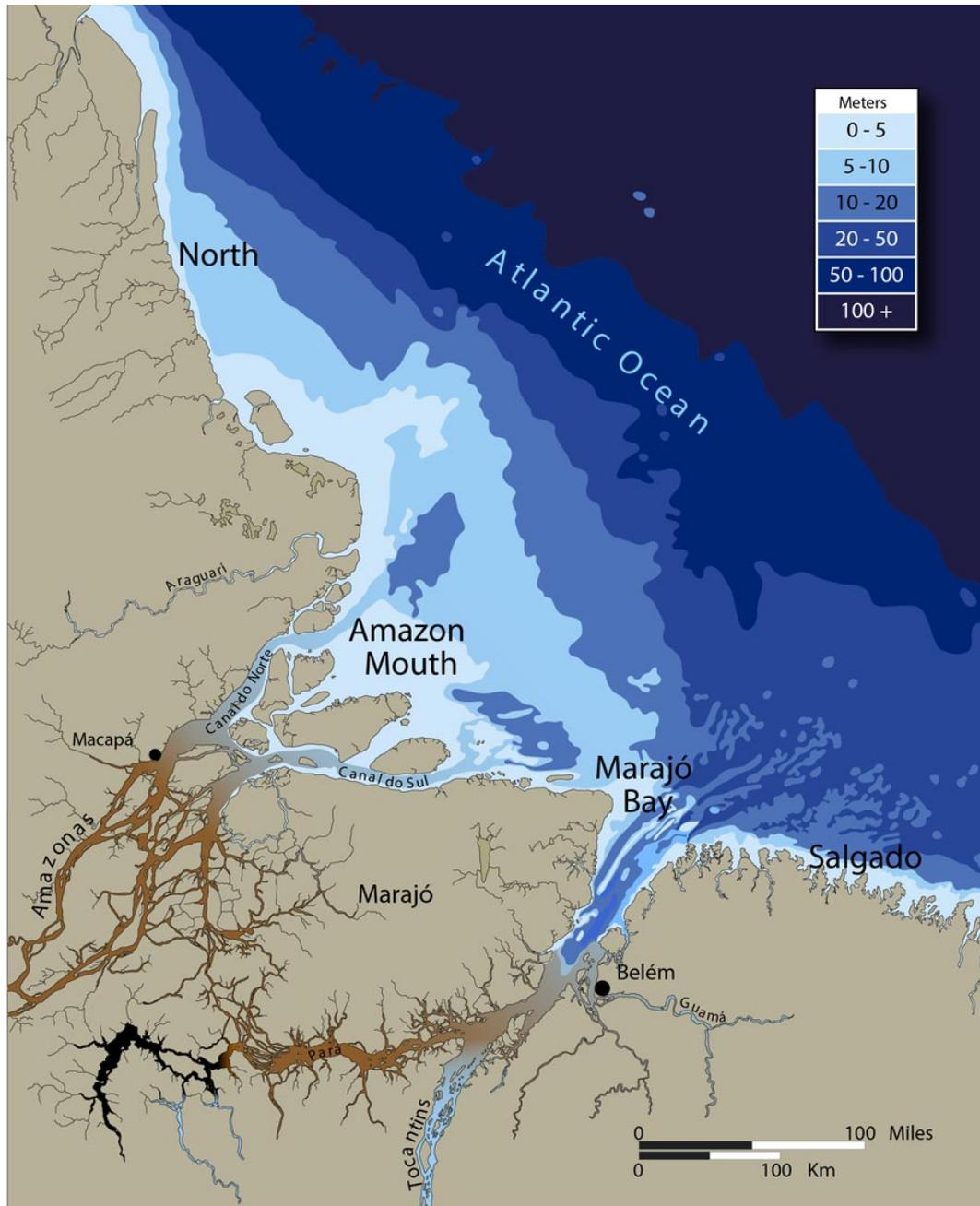


Figura 2.4: Localização do Estuário do Rio Pará.

2.1.5 Aspectos Climáticos

O estudo do clima na região Belenense é de grande importância no trabalho, pois os levantamentos na praia com o intuito de observar o lençol freático estão diretamente relacionados com a quantidade de chuvas na região.

O estado do Pará é caracterizado por apresentar altos índices de precipitação devido

à sua localização na zona equatorial do globo. O clima da região é influenciado por sistemas atmosféricos de meso (como Linhas de Instabilidade) e grande escala (Zona de Convergência Intertropical - ZCIT), que podem provocar grande quantidade de chuva. (Figueiredo, 2009)

A representação gráfica da quantidade de precipitação Figura 2.5 indica que nos meses de janeiro a maio se produz excedentes de água precipitada ou seja a quantidade de chuvas é maior com isso os aquíferos recebem maiores recargas. Nos meses de julho a novembro a precipitação de chuvas é menor, indicando que este seria o período seco.

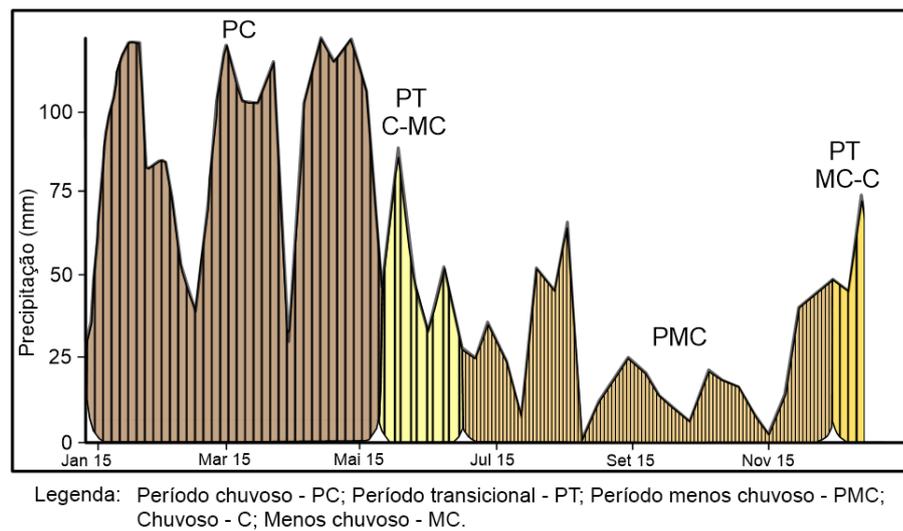


Figura 2.5: Índice de precipitação pluviométrica durante os períodos sazonais (Inmet 2015).

3 METODOLOGIA

3.1 GROUND PENETRATING RADAR (GPR)

O GPR é um método eletromagnético que utiliza ondas EM em frequências pré-definidas que vão de 10 a 2500 MHz para localizar estruturas, feições geológicas, objetos enterrados em subsuperfície observando a mudança de propriedades dielétricas dos materiais.

Tabela 3.1: Estimativa da profundidade máxima de penetração em função da frequência central das antenas Adaptada de Porsani (1999).

Frequência Central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
900	1
400	4
270	6
200	9
100	15
16-80	até 50

O sistema do GPR é composto por uma antena transmissora (Tx) que irradia ondas de alta frequências para a subsuperfície e a antena receptora (Rx) onde é captado o sinal refletido que volta a superfície, quando as antenas estão separadas a geometria é **biestática** que é a mais utilizada nos levantamentos. O par de antenas é acoplado a uma unidade computacional onde é visualizado a resposta em forma de radargrama das ondas refletidas que com informações da subsuperfície. (Figura 3.1)

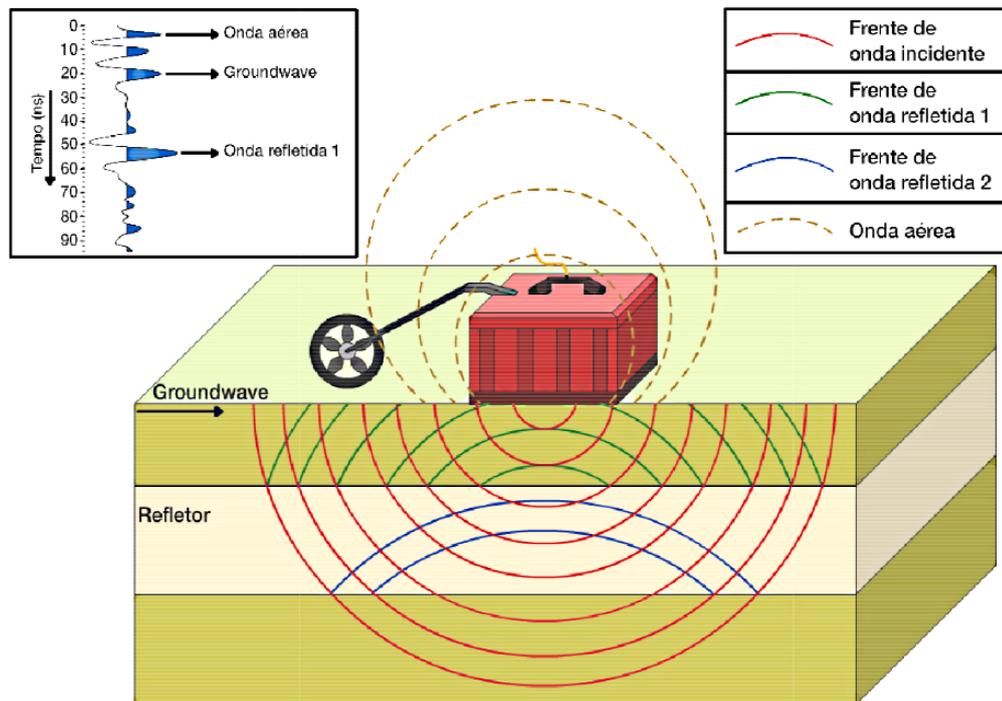


Figura 3.1: Esquema de transmissão do sinal de GPR em subsuperfície Adaptado de Santos (2010).

A aquisição é realizada instantaneamente e o tempo necessário para a onda eletromagnética percorrer o caminho que vai da antena transmissora até a interface receptora (antena receptora) é da ordem de nanosegundos (ns) e é denominado range (janela de tempo).

Como dito o que se analisa é o radargrama definido com sendo conjunto de traços em resposta da propagação da onda eletromagnética em cada ponto do terreno onde foi realizada a aquisição (Figura 3.2). Este traço possui amplitudes proporcionais ao contraste elétrico dos materiais por onde a onda se propagou e quando colocados lado a lado formam uma imagem da subsuperfície.

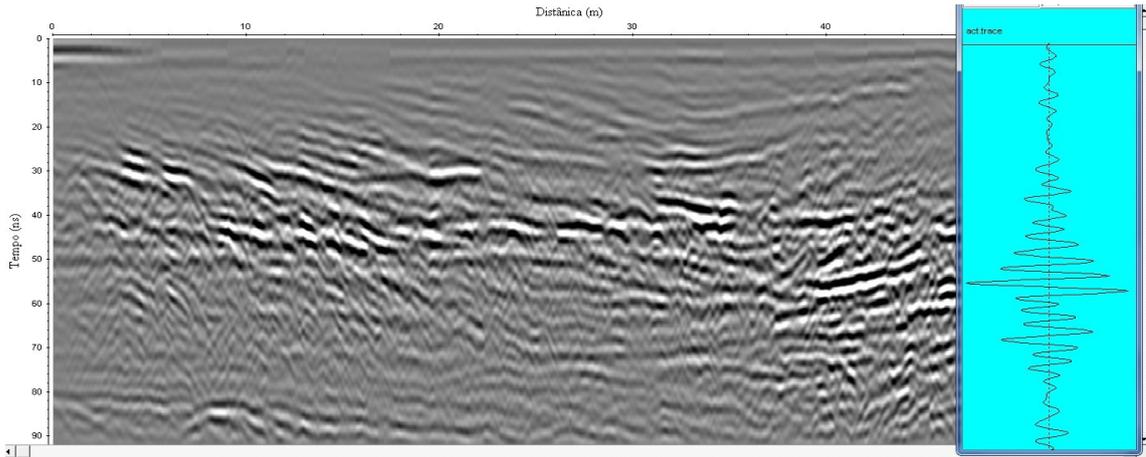


Figura 3.2: Radargrama (esquerda) gerado a partir de traços (direita), representando uma pseudo-imagem da subsuperfície.

3.1.1 Estudo dos Parâmetros Geométricos

Como todo método eletromagnético o GPR se baseia nas equações de Maxwell, que descrevem o comportamento dos fenômenos eletromagnéticos no meio.

As Equações de Maxwell que descrevem matematicamente a física dos campos EM, combinadas com as relações constitutivas do meio que quantificam as propriedades dos materiais, descrevem o comportamento da onda EM se propagando em subsuperfície Jol (2008).

Em termos matemáticos, os campos eletromagnéticos e suas relações podem ser expressas como :

$$\vec{\nabla} \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \mathbf{D} = q \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.4)$$

Onde:

\mathbf{E} : vetor campo elétrico (V/m);

\mathbf{B} : vetor densidade de fluxo magnético (T);

\mathbf{J} : vetor densidade de corrente elétrica (A/m²);

\mathbf{D} : vetor deslocamento elétrico (C/m²);

\mathbf{H} : vetor intensidade do campo magnético (A/m);

q : densidade de carga elétrica (C/m³);

t : tempo;

Maxwell resumiu de maneira sucinta o trabalho de numerosos pesquisadores nessa forma compacta. A partir dessas relações, todos os campos eletromagnéticos clássicos (indução, ondas de rádio, resistividade, teoria dos circuitos, etc.) podem ser achados quando combinados com formalismo que caracterize as propriedades elétricas do material (Jol, 2008). As relações constitutivas são maneiras de relacionar as propriedades físicas do material aos seus campos eletromagnéticos. São elas a condutividade elétrica (σ), permissividade dielétrica (ε) e permeabilidade magnética (μ).

1. Condutividade Elétrica

Conhecida também como Lei de Ohm, esta é a primeira relação onde relaciona-se a densidade de corrente elétrica (\mathbf{J}) e o campo elétrico (\mathbf{E}) descrita como:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.5)$$

Em materiais geológicos simples essa relação é quase que linear onde a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica (σ). A condutividade elétrica de um material é a capacidade deste conduzir corrente elétrica Keller (1987).

Os principais fatores que podem alterar o valor da condutividade elétrica no meio são: porosidade, salinidade, teor de argila, teor de argila e a presença de minerais condutivos.

Em aplicações mais específicas como em levantamentos de GPR a unidade de medida é mS/m.

2. Permissividade Dielétrica

A segunda relação envolve a Permissividade Dielétrica que descreve a capacidade de um material para armazenar e liberar energia eletromagnética sob a forma de carga elétrica e se relaciona com a capacidade de armazenamento de capacitores.

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (3.6)$$

Alternativamente, a permissividade pode ser descrito como a capacidade de restringir o fluxo de cargas livres ou o grau de polarização (em F / m) exibido por um material sob a influência de um campo elétrico aplicado. Com isso temos a Permissividade relativa (ε_r) que é descrita por:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (3.7)$$

Onde :

ε : Permissividade no meio em (F/m);

ε_0 : Permissividade no vácuo $8854 \times 10^{-12} F/m$;

3. Permeabilidade Magnética

Está relacionada ao vetor intensidade de campo magnético (\mathbf{H}) e ao vetor indução magnética (\mathbf{B}) e é medida em Henry por metro (H/m), de acordo com a equação abaixo:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (3.8)$$

É importante ressaltar que em muitas situações geológicas os fatores que realmente controlam o sinal do GPR são as propriedades elétricas. Portanto supõe-se que a permeabilidade magnética independe da frequência na maioria dos materiais geológicos e não varia significativamente com a permeabilidade magnética no vácuo. Olhoeft (1981); Keller (1987)

3.1.2 Propagação das Ondas Eletromagnéticas

O método GPR utiliza um dipolo elétrico horizontal como fonte do campo de ondas eletromagnéticas. A onda eletromagnética consiste na oscilação de um campo elétrico e de um campo magnético. Porém como ambos possuem soluções semelhantes se utilizou apenas a do campo elétrico (\mathbf{E}) dada por:

$$\nabla^2\mathbf{E} = \mu\sigma\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} + \mu\varepsilon\frac{\partial^2\mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

E a solução geral para a equação da onda é representada por :

$$E = E_0e^{\alpha z}e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (3.10)$$

Em que E_0 é amplitude máxima da onda, z é a profundidade α é a constante de atenuação da onda β é a constante de propagação da onda

Em um meio com baixas perdas de energia α e β podem ser descritos como sendo:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (3.11)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \quad (3.12)$$

O contraste entre as propriedades eletromagnéticas pode ser representado por meio do coeficiente de reflexão definido por:

$$C_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3.13)$$

Em que Z_1 equivale a impedância intrínseca do meio 1 e Z_2 a impedância do meio 2.

Sendo Z dado pela equação:

$$Z = \frac{\sqrt{i\omega\mu}}{\sigma + i\omega\varepsilon} \quad (3.14)$$

A impedância Z pode ser aproximada para $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ em meios com baixa condutividade. Substituindo na equação 2.14 temos :

$$C_r = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \quad (3.15)$$

A atenuação é um dos parâmetros que limitam a profundidade de penetração de energia no meio. Essa profundidade de penetração é controlada pela frequência de operação do GPR e a resistividade do meio, definida como *Skin Depth* (δ):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (3.16)$$

A onda eletromagnética se propaga no vácuo com velocidade de $0.3m/ns$ e no meio geológico com valores, geralmente, compreendidos entre $0.06m/ns$ e $0.16m/ns$. Em subsuperfície esta velocidade é reduzida devido ao espalhamento e atenuação do sinal, fenômenos que dependem das propriedades geoeletricas do meio. Dentre essas três propriedades, apenas a condutividade elétrica e a permissividade elétrica controlam a velocidade. Assim, segundo Daniels (1996), a velocidade de propagação de onda eletromagnética é dada pela expressão:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r \left(\frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}}{2} \right)}} \quad (3.17)$$

A equação 3.17 nos permite determinar o valor da velocidade de propagação da onda eletromagnética em um meio com permissividade dielétrica relativa (ε_r), condutividade elétrica (σ) e permeabilidade magnética (μ). Onde c é a velocidade da luz no vácuo, $\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$ é o fator de perda e ω é a frequência (citar). A partir desta equação pode-se observar, através do fator de perda, que quando a condutividade aumenta a velocidade da onda diminui.

Porém como o meio é de pequenas perdas de energia e onda eletromagnética é alta frequência a equação 3.17 pode ser escrita como :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3.18)$$

Conhecer essas propriedades é importante para que haja melhor interpretação, pois, sabendo o tempo de trânsito entre o início e a chegada da onda refletida e a velocidade da propagação da onda eletromagnética no meio é possível estimar a profundidade em

subsuperfície aproximada em estudos que sejam de interesse para a pesquisa de campo.

A Tabela 3.2 mostra valores de a condutividade e a velocidade aproximada de alguns materiais. Esses valores são utilizados geralmente na interpretação de litologia ou no processo de modelagem geofísica.

Tabela 3.2: Condutividade elétrica (σ), velocidade (v) típicas de alguns materiais Adaptada de Davis and Annan (1989).

Material	σ	v(m/ns)
Ar	0	0,30
Água fresca	0.,5	0,033
Água do mar	3000	0,01
Solo Arenoso Seco	0,14	0,18
Solo Arenoso Saturada	6,9	0,06
Ferro	10^9	0,3

4 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

4.1 OPERAÇÕES DE CAMPO

Para as coletas de dados de GPR foi utilizado o equipamento SIR System-3000 da GSSI (*Geophysical Survey Systems, Inc.*), com uma antena biestática blindada de 200Mhz (Figura 4.1A). Esta frequência permitiu investigar profundidades de até 7 m com um aceitável nível de ruído.

O método de aquisição dos dados consistiu em executar perfis de reflexão, orientados perpendicularmente à linha de preamar. Na execução desses perfis, foi percorrida uma linha demarcada sobre o terreno (abrangendo os setores de supramaré e intermaré), deslocando as antenas do GPR ao longo desta linha, e executando leituras em pontos equidistantes (Figura 4.1B). Nos perfis adquiridos foi usada a configuração das antenas em modo *common offset*, ou seja, separação entre a antena transmissora e receptora constante.



Figura 4.1: Operações de Campo. A) Aparelho GPR utilizado nos levantamentos; B) Perfil de GPR realizado na praia do Farol.

Os levantamentos foram realizados em um intervalo de 3 meses, com o início em Fevereiro de 2015 a Março de 2016. O tamanho dos perfis variaram de 40 metros a 60 metros de comprimento levando em consideração a máxima baixa-maré de cada período. Realizando um total de 5 sondagens de GPR ao longo do trabalho.

Para a observação sazonal do nível freático foram realizadas medições de nível em poços de abastecimento dos estabelecimentos comerciais existentes nas praias (melhor e mais barato instrumento de observação do nível, porque as observações refletem perfeitamente a posição e oscilação reais do nível freático). Para a leitura da profundidade do nível freático, foi utilizado o medidor de nível marca SoilControl, modelo *WaterControl/ECP* (cabo de 100m), equipamento elétrico que possui uma fita milimetrada de 10mm de largura ligada a um sensor tipo eletrodo cromado, com ponta em tecnil, que, ao ser introduzido nos poços, emite um sinal sonoro quando atinge o nível d água (Figura 4.2).



Figura 4.2: Mensuração do nível do nível freático em poço de abastecimento mediante utilização do medidor eletrônico.

Durante a etapa de campo, todos os levantamentos foram realizados no mesmo ponto tomando como referência um poste de energia elétrica localizado na rua Beira-mar e levando em consideração a sazonalidade, pois na região amazônica ocorre um período mais chuvoso (janeiro a abril) e um período menos chuvoso (setembro a dezembro) (Figura 2.5).

4.2 PROCESSAMENTO DE DADOS

Após a aquisição das seções de GPR os dados serão processados no software *Reflex-Win7.0* seguindo a rotina de processamento :

1. **Interpolação das marcas horizontais** que normaliza a escala horizontal do perfil coletado no modo tempo (SANDMEIR, 2011). Neste trabalho as marcações horizontais foram feitas de 10 metros em 10 metros. E o traço do incremento foi ajustado a partir da quantidade de traços que havia no radargrama variando entre $0.8cm$ a $1.2cm$.
2. **Correção Estática** (*Set time zero*) este filtro foi utilizado com o objetivo de eliminar o efeito da onda direita e realiza a correção do tempo zero. Este passo do processamento é aplicado a fim de realizar o ajuste do tempo-nulo (tempo zero) com a profundidade nula e corrigir a topografia do terreno (Lima, 2006).
3. **Aplicação de Ganho Manual na direção Y**, este filtro nos permitiu definir uma curva de ganho de forma manual na direção y (tempo) e aplicar a mesma sobre cada ponto de cada traço do dado .As funções Ganho geralmente tentam compensar os efeitos da atenuação do sinal do radar, melhorando a visualização das estruturas mais profundas (Furtado, 2009) .
4. **Filtragem 1D**, *BandPass Frequency* e *BandPass Butterworth* são filtros que ajudam a eliminar ruídos de baixa e alta frequência, melhorando significativamente a relação sinal/ruído, contribuindo para facilitar a identificar os alvos (Fernandes, 2005).

Estes filtros dependem da frequência central utilizada no levantamento (200MHz), nos permite criar uma banda de frequência em que os traços fora desta banda são eliminados. Para o filtro *BandPass Frequency* utilizou-se 4 valores de frequência para criar a banda chamados *Low-cut frequency* : 70MHz *Lower plateau* : 100MHz *Uper plateau* : 350MHz *High-cut frequency* : 450MHz . Para o filtro *BandPassa Butterworth* são usados os valores específicos de *Low-cut frequency* : 100MHz e *High-cut frequency* : 400MHz . O filtro *Dewow* 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. 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).

5. **Filtro-Fk** é empregado para atenuar ruídos de refletores inclinados e enfatizar mergulhos procurados. Sua aplicação envolve a geração do *fk- spectrum*, o qual realiza a Transformada de Fourier dos dados do domínio do tempo-espaco para o domínio frequência-número de onda e fornece o *spectrum fk* correspondente (Furtado, 2009).

4.2.1 Coleta de sedimentos intermarés e supramaré

Solos e sedimentos, em geral, apresentam conexão entre seus poros e caminhos preferenciais, pelos quais os fluídos podem circular. A facilidade com que um fluído percola a matriz sedimentar porosa constitui uma importante propriedade, conhecida como permeabilidade, a qual é mensurada pelo coeficiente de permeabilidade (FAPESPA, 2017). Então a descrição e determinação da granulometria dos grãos nos permite observar o quanto um líquido é capaz de permear entre os poros. Dependendo da quantidade e do tipo de líquido presente na formação, esse fenômeno pode influenciar diretamente no comportamento do sinal do GPR.

A coleta de sedimentos praias ocorreu na camada superficial ($\pm 50\text{ cm}$) e ao longo dos perfis monitorados. Para essa coleta foi utilizada uma espátula e coletada uma quantidade em torno de 200g . As amostras foram devidamente etiquetadas e levadas para o Laboratório de Análises de Sedimentos e Solos do Museu Paraense Emílio Goeldi, onde foi realizada a preparação para análise granulométrica.

Além dos sedimentos superficiais foi amostrado o pacote sedimentar nos setores intermaré e pós-praia (Figura 4.3). Foi utilizado um amostrador à vibração, acoplado a tubo de alumínio. Testemunhos foram retirados para posterior análise granulométrica e descrição das estruturas sedimentares. Dada a dificuldade de penetração no pacote sedimentar arenoso, as coletas com tubos de alumínio não foram superiores a 2m . Na retirada dos tubos, esses foram serrados bem próximo ao topo da sequência amostrada (Figura 4.4).

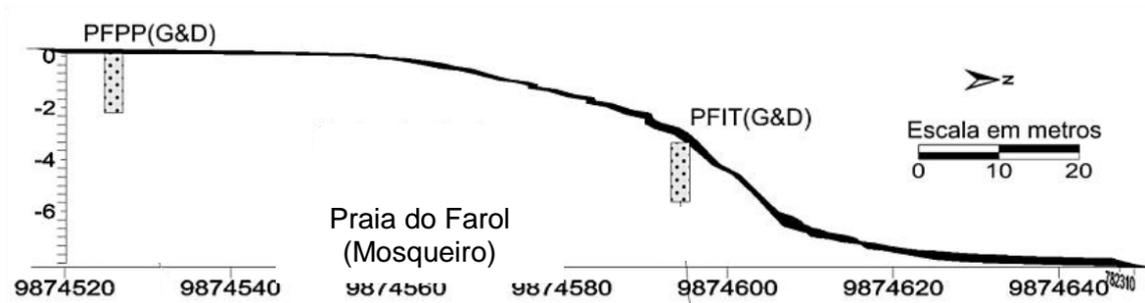


Figura 4.3: Localização dos testemunhos litológicos no setor supramaré e intermaré Fonte : FAPESPA (2017).

Após a separação granulométrica por peneiramento foi extraída uma alíquota da classe granulométrica dominante, a qual foi disposta em uma lâmina reticulada, de fundo preto e fosco. Para a observação dos grãos, foi utilizada as frações de areia grossa (500 μ m), onde foram observados grãos de quartzo, dada a sua ampla distribuição nos sedimentos praias. Essa fração e areia foi disposta em lâmina reticulada, com fundo preto e fosco para análise em uma lupa binocular com iluminação por reflexão dirigida a 45° e zoom óptico de 0,75x.

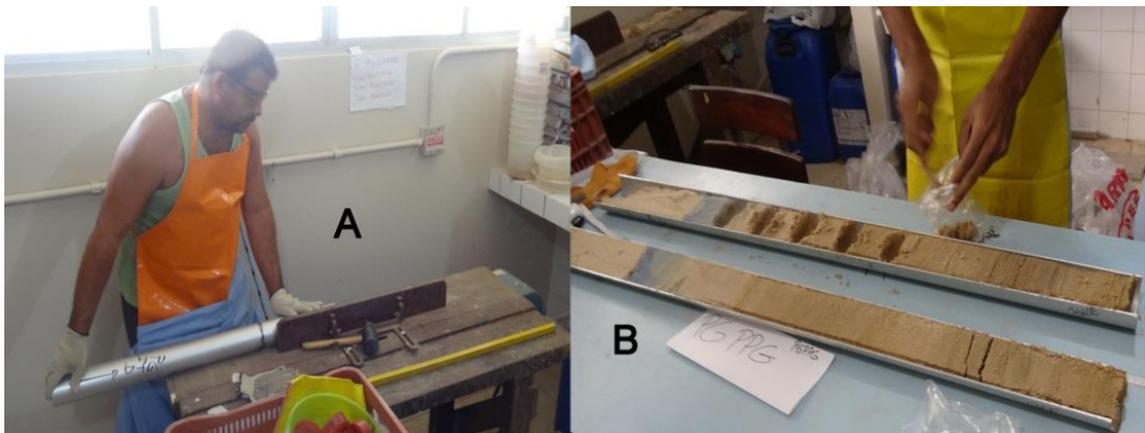


Figura 4.4: (A) Corte longitudinal dos testemunhos obtidos com *Vibracore*; (B) Subamostragem de sedimentos em uma das calhas do testemunho.

Em cada amostra foram observados 100 grãos. Evidentemente que a observação de um número maior de grãos ampliaria o rigor estatístico da análise, normalmente não conduz a melhoria significativa dos resultados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DA PRAIA DO FAROL

A distribuição granulométrica dos sedimentos da praia do Farol evidencia a predominância de areia média, na zona de supramaré, com algumas frações finas encontradas em junho e setembro, e areia muito grossa no setor intermaré, sobretudo nos meses chuvosos (Fevereiro e Março), não havendo variações de classes granulométricas ao longo do ciclo climático sazonal. A predominância de areia média pode ser explicada pela baixa energia diária de ondas, que contribui para a não remoção de partículas mais grossas, não havendo nenhum mecanismo para deposição de areia fina entre períodos de maior energia e, também, por não ocorrer ondas de *swell* longas, planas, que normalmente são responsáveis pelo transporte de sedimentos finos.

Texturalmente, os sedimentos superficiais do setor supramaré da praia do Farol são moderadamente selecionados e compostos por grãos angulosos. No setor intermaré a granulometria varia entre areia grossa a muito grossa, bem selecionada e com grãos angulosos.

O pacote sedimentar no setor supramaré apresentou comportamento homogêneo quanto à distribuição granulométrica, constituído por uma camada uniforme de areia média (Figura 5.1). No entanto, no setor intermaré, o pacote de areia muito grossa apresentou intercalações com níveis de areia grossa e areia média no período invernos, tornando-se homogêneo (areia grossa) no período seco (Figuras 5.1 e 5.2).

Texturalmente a zona supramaré apresenta comportamento homogêneo em subsuperfície, sendo constituída por um pacote de areia média, moderadamente selecionada, composta por grãos angulosos. No setor intermaré, o pacote sedimentar apresenta variações granulométricas, variando de areia muito grossa a areia grossa, bem selecionada, com grãos angulosos a subangulosos.

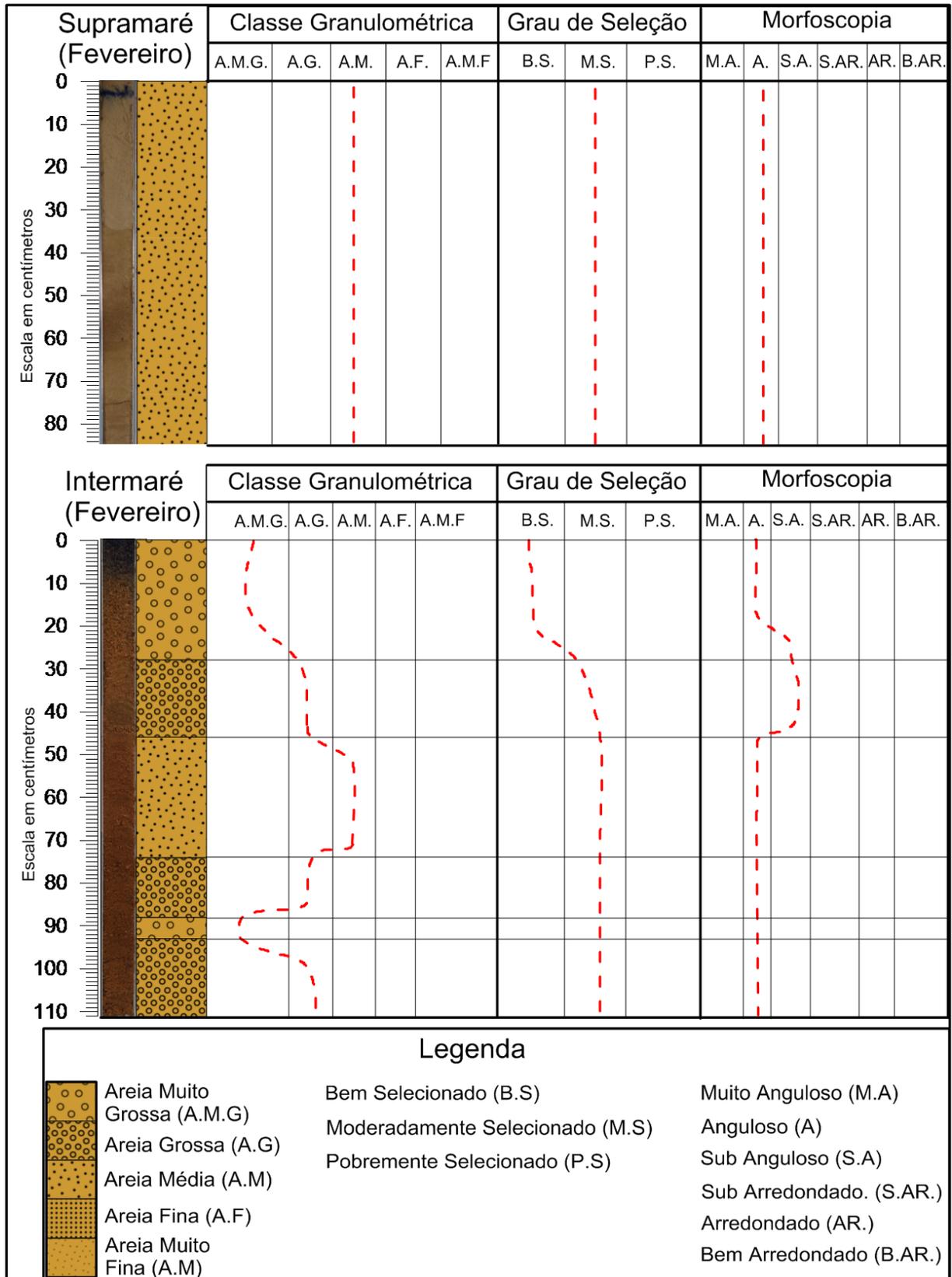


Figura 5.1: Distribuição granulométrica, grau de seleção e morfoscopia em subsuperfície nos setores supramaré e intermaré da Praia do Farol (Mosqueiro), no mês de Fevereiro
 Fonte : FAPESPA (2017).

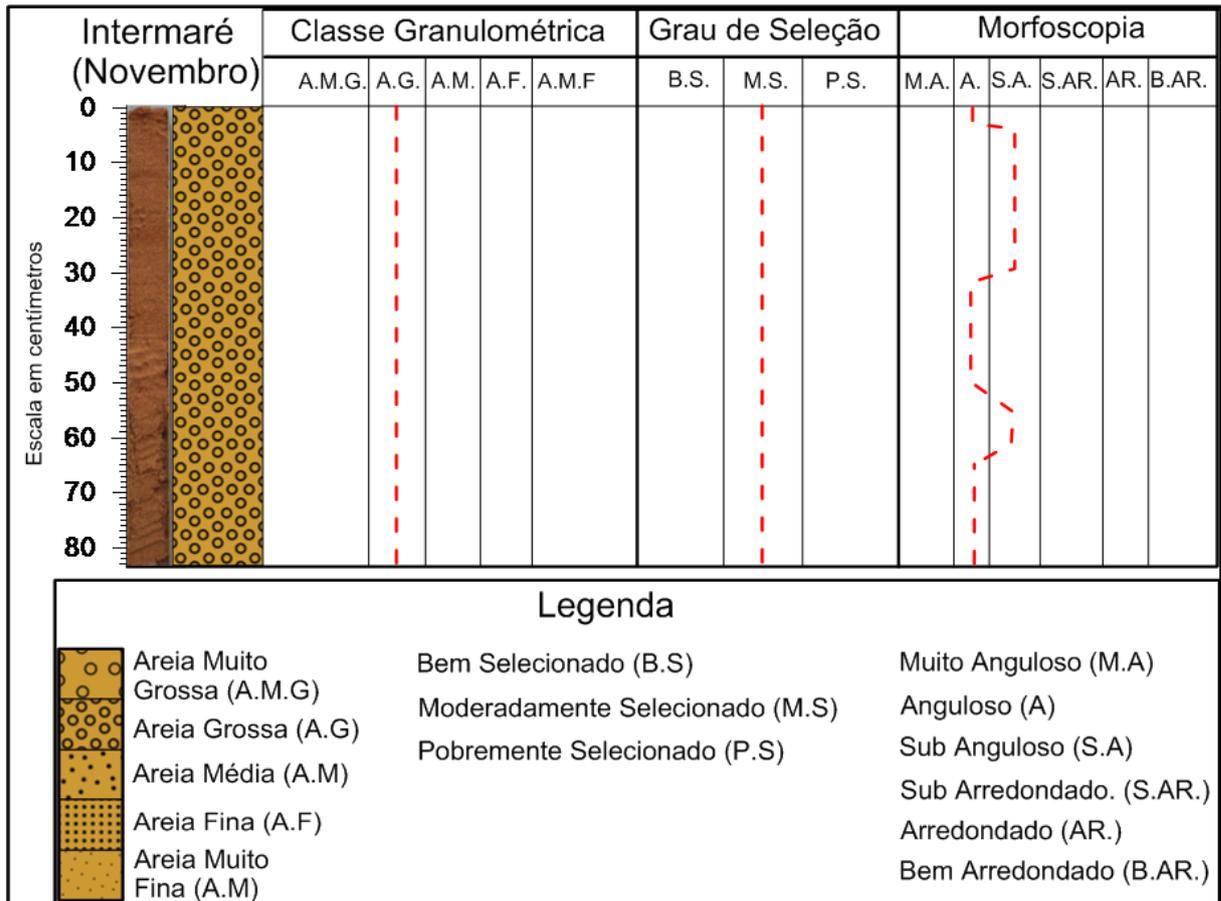


Figura 5.2: Distribuição granulométrica, grau de seleção e morfoscopia em subsuperfície no setor intermaré da Praia do Farol (Mosqueiro), no mês de Novembro Fonte : FAPESPA (2017).

Apesar das informações dos testemunhos realizados ao longo dos perfis de GPR devido a profundidade muito superficial que o método conseguiu penetrar no pacote sedimentar, cerca de 80-110 centímetros não foi possível correlacionar com as sondagens de GPR.

5.2 PERFIS DE CAMPO

Os parâmetros utilizados na aquisição como o range (janela de tempo em ns), comprimento do perfil e número de amostras por *scan* foram escolhidos de acordo com a época do ano para cada etapa dos levantamentos, uma vez que dependiam da umidade do solo e da linha preamar máxima.

Na etapa da pesquisa realizada em Fevereiro de 2015, a linha de aquisição do perfil GPR teve um comprimento de 54 metros, com intervalo de marcação de 10 metros, com todas as medidas sendo adquiridas em linhas perpendiculares em relação à faixa de areia na direção Sul-Norte, e a janela de tempo neste levantamento foi de 100ns. É importante destacar em relação à topografia do local, que ao longo do perfil foi registrada uma forte declividade do berma em direção à linha de maré, iniciando próximo de 28 metros do início do perfil (Figura 5.3).

Os resultados permitiram medir a profundidade do nível freático em 1,9 metros abaixo do ponto inicial do perfil (Figura 5.3), e a velocidade média foi aproximadamente $0,095\text{m/ns}$ no meio saturado. Essa estimativa foi feita através da superposição de hipérbole, tomando como referência a tabela 3.2.

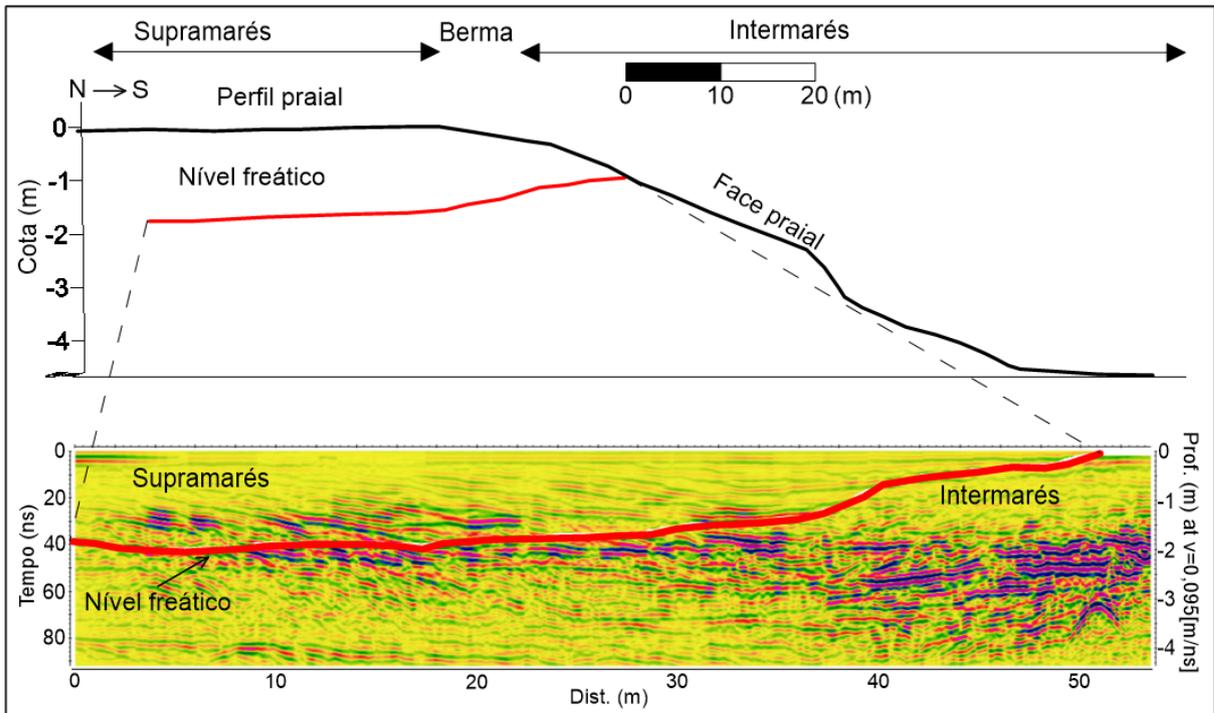


Figura 5.3: Comportamento do nível freático em relação a topografia local em fevereiro de 2015, no período chuvoso.

Na segunda etapa de campo, ocorrida em Junho de 2015, foi realizado um perfil de 52 metros de extensão no mesmo ponto e com intervalo de marcação igual ao anterior, com um range de 150ns devido a maior penetração do sinal na areia (Figura 5.4). Após o processamento dos dados, foi possível observar o nível freático com 2 metros de profundidade, sempre tomando como referência o ponto inicial do perfil. No radargrama ainda é possível observar o padrão hiperbólico no final do perfil destacado na figura anterior e, logo abaixo, em torno de 4 metros uma forte reflexão horizontal que pode estar associada a concreções rochosas ferruginosas encontradas no limite entre o final da Formação Pós-Barreiras e o início da Formação Barreiras na região da ilha, segundo Costa et al. (1991)

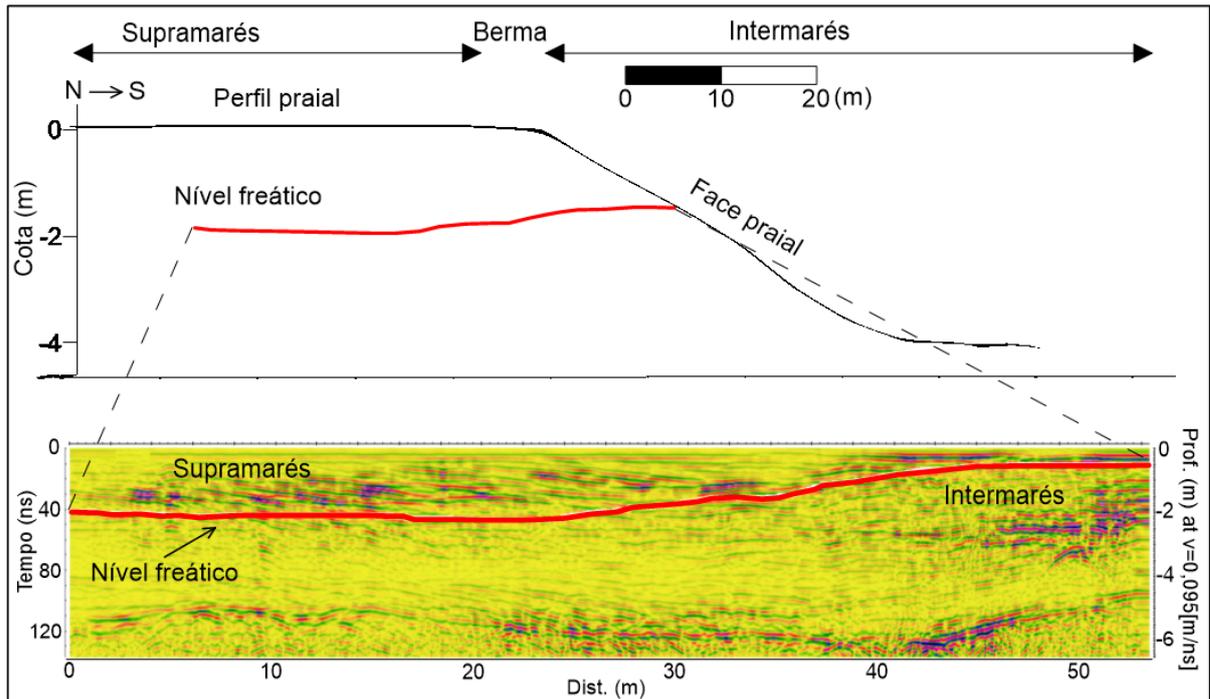


Figura 5.4: Comportamento do nível freático em relação a topografia local em Junho de 2015, no período intermediário.

Na campanha realizada em Setembro de 2015, foi realizado um perfil de 55 metros com um range de 180ns, e o resultado mostra que o nível freático encontra-se a 2 metros de profundidade (Figura 5.5). Foi observado também, neste perfil, que ocorreu uma zona de atenuação do sinal do GPR, possivelmente relacionada com a presença de quantidades elevadas de sal no sedimento. No segundo semestre do ano a salinidade marinha apresentou influência maior sobre as águas fluviais devido a escassez de chuvas, influenciando fortemente os ambientes estuarinos nesta época do ano.

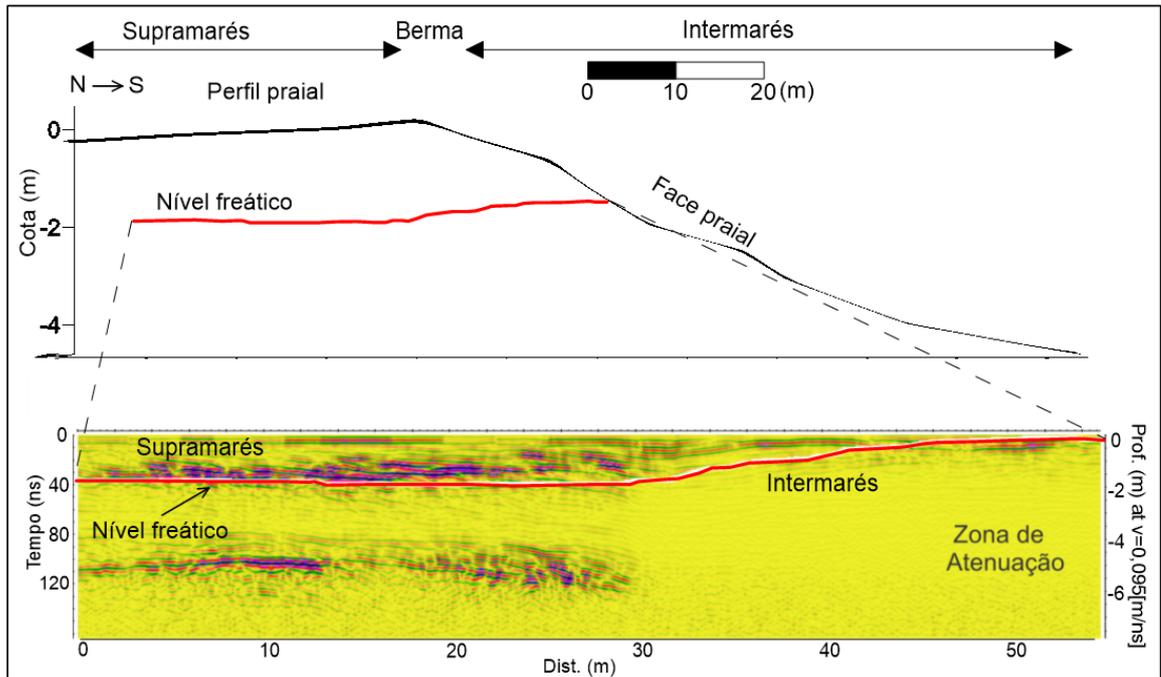


Figura 5.5: Comportamento do nível freático em relação a topografia local em setembro de 2015, no período seco.

Em Novembro de 2015, o perfil realizado teve 60 metros de comprimento, com um range de 180 ns, mostrando o nível freático com 2 metros de profundidade em relação ao ponto inicial do perfil (Figura 5.6). Os resultados mostraram novamente uma zona de atenuação a partir dos 30 metros e, ainda foi possível observar, refletos nos primeiros 30 metros com uma profundidade de 4 metros, permitindo inferir que a influência salina é reduzida nesta porção inicial do radargrama.

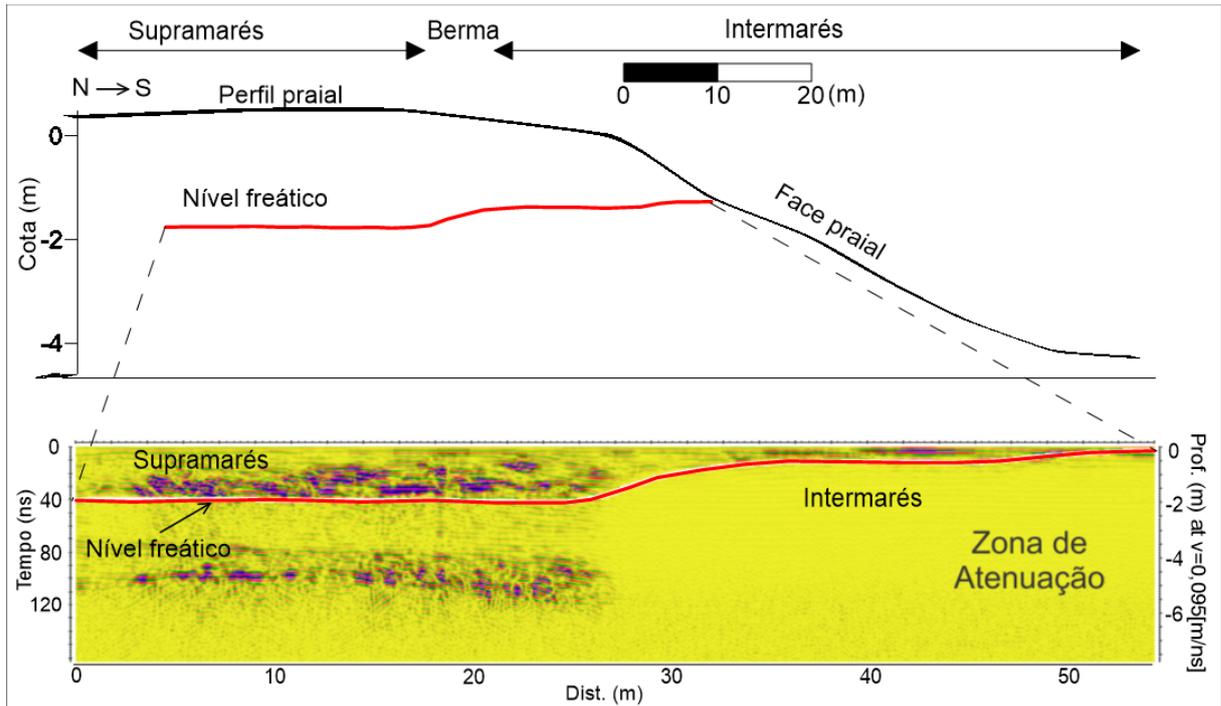


Figura 5.6: Comportamento do nível freático em relação a topografia local em Novembro de 2015, no período seco.

Em Março de 2016, o perfil realizado com um range de 180ns teve 40 metros de comprimento, pois com a enchente da maré, a zona de espraiamento diminui (Figura 5.7). O nível freático alcançou 1 metro de profundidade, pois durante o período mais chuvoso a água infiltra na areia e chega ao nível, aumentando seu volume e, assim, ficando mais próximo a superfície. Na Figura 9 não foi observada a zona de atenuação encontrada nos perfis anteriores, indicando que nesta época do ano a influência salina é mínima ou inexistente. No início do perfil são observadas duas interfaces horizontais distintas, com espessura média de 1,5 metros, que podem corresponder a sedimentos arenosos da Formação Pós-Barreiras e a partir de aproximadamente de 7 metros de profundidade, na faixa atenuada do sinal, infere-se podemos considerar que seja a Formação Barreiras onde é possível encontrarmos rochas argilíticas laminadas.

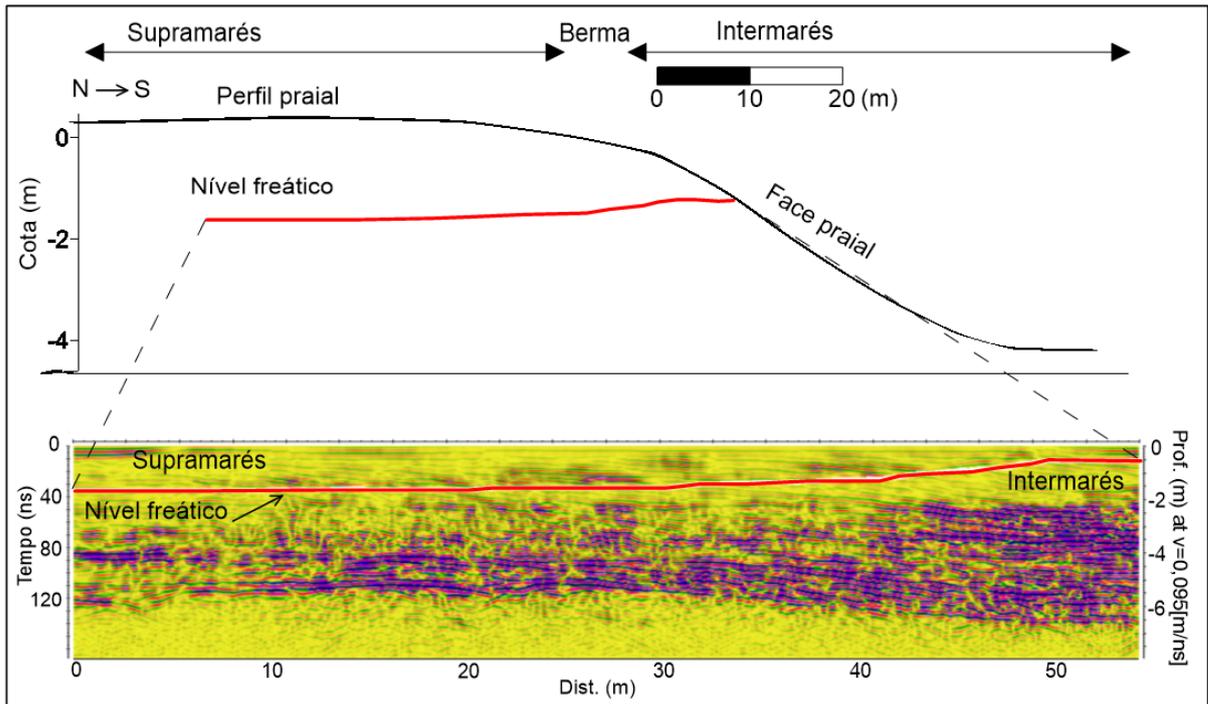


Figura 5.7: Comportamento do nível freático em relação a topografia local em Março de 2016, no período seco.

Todos os perfis coletados com o radar de penetração de solo foram correlacionados com os dados da observação sazonal do nível freático, com medições de nível em poços de abastecimento dos estabelecimentos comerciais existentes nas praias. Essas correlações e refletem perfeitamente a posição e oscilação reais do nível freático, que foram coerentes com o que os perfis de georadar mostraram nos períodos cobertos pela pesquisa.

5.3 MODELAGEM GEOFÍSICA

A modelagem eletromagnética é uma ferramenta eficaz, capaz de ajudar na interpretação dos radargramas obtidos em campo. A construção de um modelo busca simular as respostas dos dados reais, para tentar prever ou confirmar possíveis resultados de um levantamento e também pode ser usada na determinação de características eletromagnéticas que melhor se ajustam para uma possível futura aquisição de campo ((Furtado, 2009)).

O fenômeno em que o sinal do GPR é totalmente atenuado a partir da porção final da berma, até então, não tinha sido analisado no ambiente estuarino da Ilha de Mosqueiro. A partir de análise dos dados sazonais foi possível associá-lo à entrada da cunha salina na praia já que os perfis que apresentaram essas características foram os realizados no período com a ocorrência menor de chuvas. Para isso a modelagem geofísica foi implementada com intuito de verificar e validar esta suposição, antes baseada apenas na análise visual do radargrama.

Foi construído um modelo geológico onde foi simulada uma camada de areia seca e, a partir da fronteira Intermaré, uma faixa superficial de areia saturada com água salobra. A segunda camada também de areia saturada com água, já supondo que o nível freático esteja nela. E uma última camada com concreções ferruginosas que afloram em certos pontos da praia (Figura 5.8).

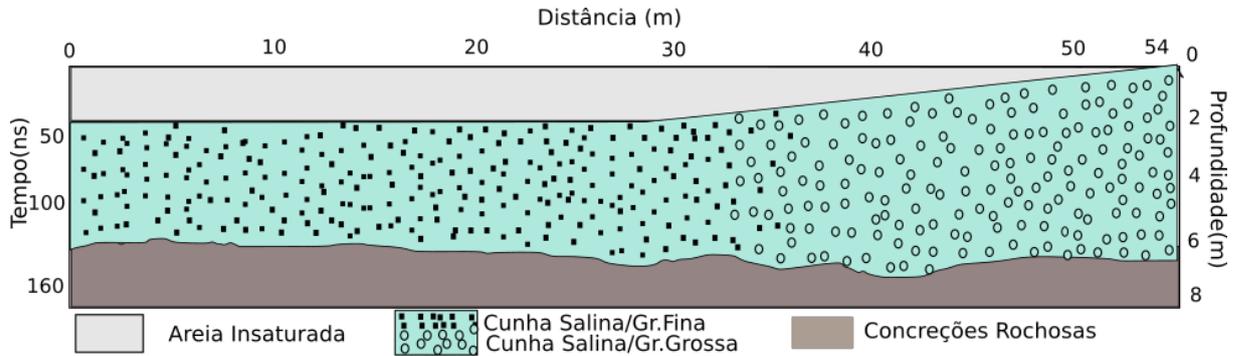


Figura 5.8: Modelo Geológico baseado no dado direto obtido em campo.

A simulação foi feita com os mesmos parâmetros utilizados em campo: a frequência de 200 Mhz, janela de tempo de 200ns e a velocidade aproximada de 0,095 m/ns. As propriedades elétricas dos materiais geológicos foram obtidas através de análise de literatura de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 5.1: Propriedades físicas dos meios utilizadas na construção do modelo.

Material	$\sigma(S/m)$	ϵ_r
Areia Insaturada	10^{-5}	6
Areia Saturada (água salgada)	1.5	31
Areia Saturada (água fresca)	0.001	20
Concreções ferruginosas	60	5

A partir dessas informações o modelo gerado no *Reflexw* é visto na Figura ?? :

Neste trabalho foi utilizado o módulo de diferenças finitas no domínio do tempo (FTTD) para a modelagem 2D dos dados de GPR, utilizando como fonte o **refletor explosivo** que permite simular um perfil GPR 2D *zero -offset*, em que as ondas são geradas simultaneamente a partir do refletor em direção a superfície, etapa equivalente a migração dos dados. Este tipo de fonte apresenta as seguintes vantagens: colapsa a energia da onda difratada para o ápice da hipérbole e não gera efeito de borda no experimento simulado (Yilmaz, 1987; SANDMEIR, 2011)

Foi adotado a absorção linear como a condição de fronteira e o tipo de sinal GPR sendo Kuepper.

Como o resultado das simulações, foi obtido um radargrama sintético onde é possível

observar a semelhança do comportamento do sinal com o dado obtido de maneira direta no campo.

A modelagem indicou que em sistemas costeiros naturais, a extensão da intrusão de água salgada é significativamente controlada pela estratigrafia dos ambientes deposicionais. Dentre os aquíferos, aqueles dominados por ondas são mais propensos à intrusão de água salgada do que os dominados por rios e marés. A salinidade aumenta, especialmente dentro de depósitos de areias estuarinas Figura 5.9. Simulações de atol e ilhas barreira revelam que ilhas de atóis de carbonato com unidades de alta condutividade são gravemente afetados pela elevação do nível do mar, resultando em redução significativa do volume de lente de água doce (Guha, 2010).

A profundidade da interface é regulada principalmente pelo sistema hidrostático, balanço de água doce e água salgada, que pode ser modificada pela exploração antrópica das águas subterrâneas. Até hoje, a intrusão da água do mar é considerada um dos mais extensos e importantes processos que degradam a qualidade da água através de um aumento nos níveis de valores de salinidade (Caroti et al., 2013).

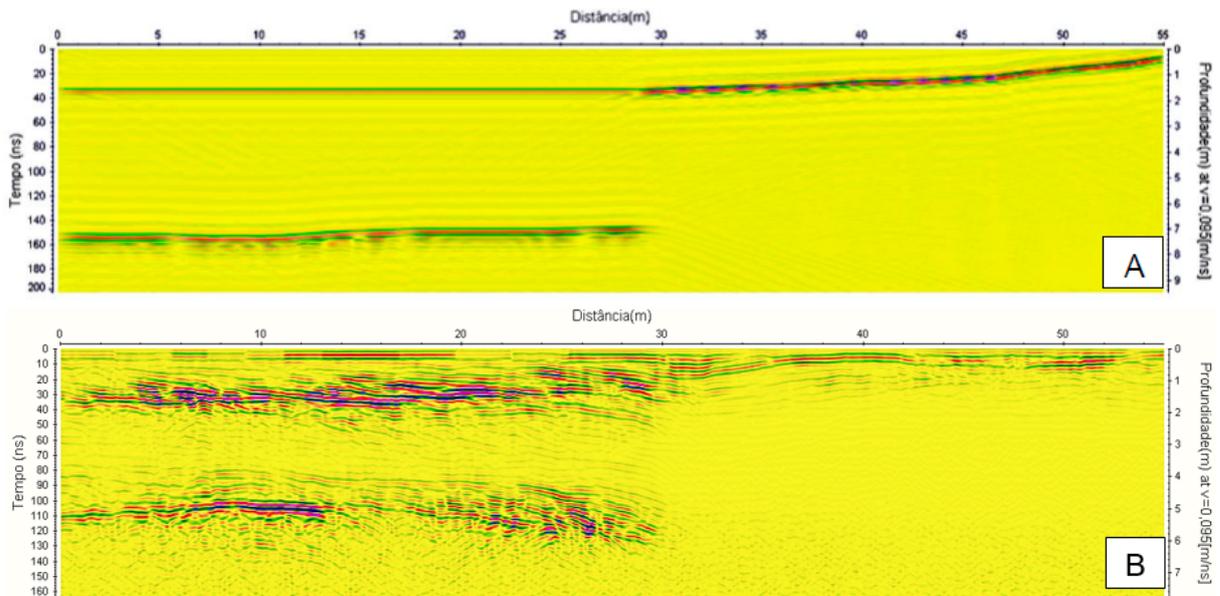


Figura 5.9: Comparação entre os radargramas obtidos de maneira indireta (Modelagem) e direta (Levantamento de campo). A) Perfil Sintético obtido através da modelagem geofísica; B) Perfil adquirido em campo em setembro de 2015

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho nos permitiu obter resultados significativos do ponto de vista geofísico no ambiente de zona costeira. O método apresentou uma alta qualidade das imagens em subsuperfície onde foi possível observar o comportamento da zona de capilaridade freática e da intrusão salina que até o presente momento não tinha sido investigada com um método físico na zona costeira amazônica.

A identificação do nível freático foi bastante clara, revelando uma transição entre zona não saturada e zona saturada bem definida, constituindo uma franja capilar pouco espessa.

Os perfis realizados na praia do Farol (distrito de Mosqueiro) identificaram a profundidade do nível freático em todas as etapas da pesquisa. No período seco ocorre a profundidade máxima de nível freático, chegando a atingir 2 metros. Na época chuvosa o nível de profundidade máximas foi de 1 metro em relação à superfície quando nos aproximamos da face praial, no setor intermaré.

Com a aplicabilidade do método na Ilha de Mosqueiro, ou seja um ambiente estuarino com livre ligação com o oceano foi possível comprovar e identificar a presença da intrusão da água salgada, que devido ao elevado valor de sua condutividade elétrica, causou forte atenuação do sinal eletromagnético do GPR e, por este motivo, pode ser mapeada no período de estiagem, com uma maior influência da água salgada diluída na água do estuário.

Apesar da abertura dos testemunhos no setor supramaré e intermaré infelizmente devido a profundidade muito rasa dos perfis litológicos não possível uma correlação entres as sondagens GPR e o perfis litológicos.

A modelagem 2D de dados de GPR mostrou que possivelmente o evento que ocorre na Praia do Farol nos meses com pouca chuva está relacionado com a influência da água salobra que penetra superficialmente até o limite da Intermaré.

A partir das informações e observações obtidas por meio deste trabalho em colaboração com ensaios de permeabilidade de líquido, estudos geoquímicos da área e dados de topografia, será possível identificar os efeitos que ambas as contaminações terão sobre o ambiente estuarino e população que reside na zona costeira amazônica, e haverá subsídios para tentar ao máximo minimizar os impactos decorrentes destas contaminações.

Contudo um estudo geofísico utilizando mais métodos é recomendado para que futuramente esse tipo de fenômeno seja mais bem caracterizado no ambiente estuarino da ilha.

REFERÊNCIAS

- Adeoti, L., Alile, O. and Uchegbulam, O., 2010, Geophysical investigation of saline water intrusion into freshwater aquifers: A case study of oniru, lagos state. *Scientific Research and Essays*, **5**(3), 248–259.
- Baltazar, L., Menezes, M. and Rollnic, M., 2011, Contributions to the understanding of physical oceanographic processes of the marajó bay-pa, north brazil. *Journal of Coastal Research*, 1443–1447.
- Bezerra, M., Medeiros, C., Krelling, A., Rosário, R. and Rollnic, M., 2011, Physical oceanographic behavior at the guama/acara-moju and the paracauari river mouths, amazon coast (brazil). *Journal of Coastal Research*, 1448–1452.
- Borges, M. S. & Angélica, R.S., 1986, Levantamento geológico da ilha de mosqueiro - estado do pará.
- Bristow, C.S. and Jol, H.M., 2003, Ground penetrating radar in sediments. *Geological Society of London*.
- Caroti, G., Piemonte, A. and Redini, M., 2013, The elevation net for the saltwater intrusion phenomenon analysis in the coastal plain of pisa. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **5**, W3.
- Costa, J., BORGES, M.d.S., Igreja, H. and PINHEIRO, R., 1991, Aspectos da tectônica cenozóica na região do salgado, litoral nordeste do estado do pará. *SIMPOSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, vol. 3, 156–165.
- Costa, J.B.S., da Silva Borges, M., Bemerguy, R.L., Fernandes, J.M.G. and de Costa Júnior, P.S., 1993, Evolução cenozóica da região de slinópolis, nordeste do estado do pará. *Geociências*, **12**(2), 373–396.
- Costa, J.B.S. et al., 1996, Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *Revista Geonomos*, **4**(2).
- da Silva, A.A. and das Virgens Alves, J.G., 2013, Investigação geofísica com os métodos slingram-hlem e gpr de contaminação salina na vila de caratateua, curuçá-pará. 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 26–29 August 2013, Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society, 238–243.
- Daniels, D., 1996, Surface-penetrating radar the institution of electrical engineers. London.

- Davies, JM & Topping, G., 1995, O impacto de um derrame de óleo em águas turbulentas: O braer. rio de janeiro.
- Davis, J.L. and Annan, A., 1989, Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical prospecting*, **37**(5), 531–551.
- Demirel, Z., 2004, The history and evaluation of saltwater intrusion into a coastal aquifer in mersin, turkey. *Journal of Environmental Management*, **70**(3), 275–282.
- FAPESPA, 2017, Permeabilidade de praias fluviais, estuarinas e oceânicas do Pará frente a eventuais derrames de derivados de hidrocarbonetos. Tech. rep., FAPESP.
- Fernandes, I., 2005, Investigações gpr em apoio á arqueologia pré-histórica na área de influência do aproveitamento hidrelétrico de dardanelos-mt.
- Figueiredo, C.T, M.M., 2009, Análise da precipitação na região metropolitana de belém (pa) ao longo de um ano (agosto/2008 a julho/2009).
- Furtado, C.P., 2009, Processamento e modelagem de dados de gpr utilizando o reflexw 4.5.
- Giraud, J., Chouteau, M., Taveau, C. and Chapuis, R., 2011, Hydrogeophysical monitoring of groundwater level changes induced by tides in a shallow beach aquifer. Near Surface 2011-17th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.
- Guha, S., 2010, Variable-density flow models of saltwater intrusion in coastal landforms in response to climate change induced sea level rise and a chapter on time-frequency analysis of ground penetrating radar signals.
- Hodlur, G., Dhakate, R. and Andrade, R., 2006, Correlation of vertical electrical sounding and borehole-log data for delineation of saltwater and freshwater aquifers. *Geophysics*, **71**(1), G11–G20.
- Igbagara, P.W., Ezekwe, I.C. and Oji, C., 2016, Hydrocarbonclasticmicroorganisms and hydrocarbon pollution of groundwater in the obagi oil fields of rivers state nigeria. *TLEP Int. J. Bio. Health Care Prac*, **2**(1), 19–28.
- Igreja, H., Borges, M., Alves, R., Costa Jr, P. and Costa, J., 1990, Estudos neotectônicos nas ilhas de outeiro e mosqueiro, ne do estado do Pará. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, SBG Natal, vol. 36.
- Jol, H.M., 2008, Ground penetrating radar theory and applications. elsevier.

- Keller, J.B., 1987, Effective conductivity of periodic composites composed of two very unequal conductors. *Journal of mathematical physics*, **28**(10), 2516–2520.
- Kumar, V.S., Dhakate, R., Amarender, B. and Sankaran, S., 2016, Application of ert and gpr for demarcating the saline water intrusion in coastal aquifers of southern india. *Environmental Earth Sciences*, **75**(5), 393.
- Lani, J., Francelino, M., Aranha, P., Rosado, V. and Vilarinho, E., 2005, Uso de gpr na identificação da profundidade do lençol freático e na mudança textural. *Anais do XXX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, INPE Recife.
- Leandro, C.G., 2018, Aplicação da análise do sinal do gpr na definição de ambientes costeiros.
- Lima, R.S., 2006, Otimização de perfis de reflexão gpr sobre manilhas de concreto e tubulações de pvc instaladas no sítio controlado de geofísica rasa do iag/usp. Mestrado (Geofísica), Universidade de São Paulo.
- Martínez, J., Benavente, J., García-Aróstegui, J., Hidalgo, M. and Rey, J., 2009, Contribution of electrical resistivity tomography to the study of detrital aquifers affected by seawater intrusion–extrusion effects: the river vélez delta (vélez-málaga, southern spain). *Engineering geology*, **108**(3-4), 161–168.
- Messinger, J., 2004, Effective automatic picking of travel time data with precision.
- Narayan, K.A., Schleeberger, C. and Bristow, K.L., 2007, Modelling seawater intrusion in the burdekin delta irrigation area, north queensland, australia. *Agricultural water management*, **89**(3), 217–228.
- Nogueira, A.C.R., Rossetti, D.d.F., Toledo, P.M.d. and Góes, A.M., 1990, Modelo deposicional preliminar da formação pirabas no nordeste do estado do pará.
- Olhoeft, G.R., 1981, Electrical properties of rocks. *Physical properties of rocks and minerals*, **2**, 257–297.
- OLIVEIRA, J.R.d., 2002, Projeto estudos hidrogeológicos da região metropolitana de belém e adjacências.
- Pereira, A.J., Gambôa, L.A., Silva, M.A.M.d., Rodrigues, A.R. and Costa, A.d., 2003, A utilização do ground penetrating radar (gpr) em estudos de estratigrafia na praia de iataipuaçu-maricá (rj). *Revista Brasileira de Geofísica*, **21**(2), 163–172.
- Porsani, J.L., 1999, "Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP. Ph.D.

- thesis, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 30.03. 99.
- Pritchard, D.W., 1956, The dynamic structure of a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.*, **15**(1), 33–42.
- Rejani, R., Jha, M.K., Panda, S. and Mull, R., 2008, Simulation modeling for efficient groundwater management in balasore coastal basin, india. *Water Resources Management*, **22**(1), 23.
- ROSÁRIO, R.P. et al., 2016, Análise de processos oceanográficos no estuário do rio pará.
- Rossetti, D., 2001, Late cenozoic sedimentary evolution in northeastern pará, brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, **14**(1), 77–89.
- Sá, J., 1969, Contribuição à geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região bragantina. *Boletim do instituto de geologia do Rio de Janeiro*, **3**, 21–36.
- SANDMEIR, K., 2011, Manual do software reflexw–version 6.0. karlsruhe,[sn].
- Santos, V.R.N.d., 2010, Emprego dos métodos eletromagnético indutivo e gpr no mapeamento de redes de interferências instaladas no sítio controlado de geofísica rasa do iag/usp. *Revista Brasileira de Geofísica*, **28**(1), 141–141.
- Silva, F.S., 2015, Análise rasa de subsuperfície com o radar de penetração de solo(gpr) em depósitos neógenos na praia do atalaia(salinas) e aricuru (maracanã), nordeste do pará.
- Sivan, O., Yechieli, Y., Herut, B. and Lazar, B., 2005, Geochemical evolution and timescale of seawater intrusion into the coastal aquifer of israel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**(3), 579–592.
- Yilmaz, O., 1987, Seismic data processing: *Soc. Expl. Geophys*, **252**.
- Zarroca, M., Bach, J., Linares, R. and Pellicer, X.M., 2011, Electrical methods (ves and ert) for identifying, mapping and monitoring different saline domains in a coastal plain region (alt empordà, northern spain). *Journal of Hydrology*, **409**(1-2), 407–422.

APÊNDICE

APÊNCIDE A - ARTIGO PUBLICADO



Artigos

A utilização do Ground Penetrating Radar (GPR) na definição de penetração de cunha salina e no monitoramento do nível freático em praia estuarina amazônica

The use of Ground Penetrating Radar (GPR) in the definition of salt wedge penetration and groundwater monitoring in the estuarine Amazonian beach

Karolina Almeida Correia¹; Marcos Welby Correa da Silva¹; Amílcar Carvalho Mendes²; Artur Gustavo Oliveira de Miranda²; Estanislau Luczynsky⁴; Ivson Roberto Viana da Cunha²

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA

² Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, PA

✉ karolinacorreiaufpa@gmail.com, welbysilva@gmail.com, amendes@museu-goeldi.br, arturgustavomiranda@gmail.com, stasnlis@yahoo.com, ivsonviana.42@gmail.com

Palavras-chave:

GPR.
Cunha salina.
Praia estuarina.
Nível freático.
Amazônia.

Keywords:

GPR.
Salt wedge estuarine beach.
Groundwater.
Amazon.

Revisado por pares.

Recebido em: 12/01/2018.

Aprovado em: 17/02/2019.

Resumo

A identificação do nível freático foi bastante clara, revelando uma transição entre zona não saturada e zona saturada bem definida. Os perfis de GPR mostraram que o topo do nível freático é registrado como um refletor horizontal forte, mergulhando em direção ao mar. O topo do nível freático na zona de pós-praia está localizado em aproximadamente 1 metro de profundidade, no período chuvoso (março), tornando-se mais profundo na zona intermarés. No período de estiagem (novembro), o topo da superfície do nível sofre rebaixamento, variando de 1,9 metros na zona supramarés, a e 2 metros na zona intermarés. A umidade do solo e, sobretudo, a presença de sal nos sedimentos praias tiveram forte influência nos sinais de reflexão, mudando a constante dielétrica dos sedimentos e, consequentemente, criando zonas de atenuação de sinais, permitindo, dessa forma, mapear a cunha salina em subsuperfície durante o período de estiagem. Contudo, é recomendado um estudo geofísico utilizando outros métodos, buscando melhores resultados do ponto de vista hidrogeológico.

Abstract

The association of survey data with records obtained through the use of the Ground Penetrating Radar (GPR), taking into account the climatic seasonality, in Praia do Farol (Mosqueiro Island / Belém-PA), revealed the behavior of the water table and the record of the penetration of the salt wedge into subsurface in this estuarine environment. The identification of the water table was very clear, revealing a transition between unsaturated zone and well-defined saturated zone. The GPR profiles show that the level of the top of the water table is registered as a strong horizontal reflector, diving towards the sea. The top of the water table in the post-beach zone is located approximately 1 meter deep in the rainy season (March), becoming deeper in the intertidal zone. During the dry season (November), the top of the surface of the sheet undergoes deepening, ranging from 1.9 meters in the supramarine zone to 2 meters in the intertidal zone. The soil moisture and, above all, the presence of salt in the beach sediments had a strong influence on the reflection signals, changing the dielectric constant of the sediments and, consequently, creating zones of signal attenuation, thus allowing mapping of the salt wedge in subsurface during the dry season. However, a geophysical study is recommended using other methods, seeking better results from a hydrogeological point of view.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ags.v33n1.29095>

1. INTRODUÇÃO

As cidades litorâneas da região metropolitana de Belém-PA têm um alto tráfego de navios e possuem zonas portuárias com grande potencial a eventos envolvendo vazamento de derivados de hidrocarbonetos. Nesse contexto, o Ministério do Meio Ambiente definiu normas e medidas para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para desastres relacionados à petróleo e derivados na zona costeira e mari-

nha, no intuito de prevenir e minimizar os impactos que o meio ambiente poderia sofrer com possíveis derramamentos de óleo.

A contaminação por derivados do petróleo em praias arenosas, que possivelmente irá atingir a zona freática, depende, dentre outros fatores, da permeabilidade do substrato, das propriedades granulométricas da areia e das características físicas do óleo (Davies & Topping, 1995).