

Utilização da ferramenta Ground Penetrating Radar (GPR) e da modelagem 3-D para a detecção da interface de interação água doce/salgada da Vila do Bonifácio, Praia de Ajuruteua (Bragança-PA)

Use of the Ground Penetrating Radar (GPR) tool and 3-D modeling to detect the sweet/salt interaction interface in Vila do Bonifacio, Praia de Ajuruteua (Bragança – PA)

DOI:10.34117/bjdv7n2-170

Recebimento dos originais: 27/01/2021

Aceitação para publicação: 09/02/2021

Evandro de Oliveira Brito

Mestre em Recursos Hídricos

Instituição: Universidade Federal do Pará – Campus Bragança

Endereço: Alameda Leandro Ribeiro - Aldeia, Bragança – PA

E-mail: evandrobrito2011@gmail.com

Paola Bianca Gomes Tabaranã Franco

Mestre em Biologia Ambiental

Instituição: Universidade Federal do Pará – Campus Bragança

Endereço: Alameda Leandro Ribeiro - Aldeia, Bragança – PA

E-mail: pgomes-oceano@hotmail.com

Pedro Andrés Chira Oliva

Doutor em Geofísica

Instituição: Universidade Federal do Pará – Campus Bragança

Endereço: Alameda Leandro Ribeiro - Aldeia, Bragança – PA

E-mail: chira@ufpa.br

RESUMO

Nas áreas costeiras, a problemática da intrusão da cunha salina muitas vezes impossibilita a utilização da água subterrânea para consumo público, com isso tem-se 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 para um desenvolvimento equilibrado e duradouro. O estudo da forma, localização e variação temporal desta interface é de extrema importância para exploração das águas subterrânea. A qualidade dessas águas é bastante susceptível a contaminação por atividades socioeconômicas, uso e ocupações do solo, provocando a contaminação desses aquíferos, que esta se tornando cada vez mais comum. Atualmente, uma problemática que está se tornando de certa forma comum, é a salinização total ou parcial dessas reservas, principalmente nas regiões litorâneas. Nessas regiões a contaminação geralmente é persistente, mas a recuperação da qualidade dessas águas é muito lenta e bastante difícil. Por isso a preservação da qualidade desses reservatórios é bastante importante, formando um quadro de equilíbrio ecológico e de fonte duradoura. Na microrregião Bragantina, mais especificamente na Vila dos Pescadores (NE do Pará), encontramos um abastecimento muito precário de água. Os

moradores dessa vila utilizam poços estilo amazonas com uma profundidade muito rasa, o que possibilita a contaminação por dejetos provenientes de fossas sépticas e da intrusão salina. O uso dos métodos geofísicos é uma alternativa rápida e de baixo custo para o diagnóstico ambiental dessas regiões. Através dos radagramas gerados pelo Ground Penetrating Radar (GPR) e da modelagem 3-D das duas áreas de estudo próximos da Vila dos Pescadores (Bragança, Pará), pode-se realizar o mapeamento dessa problemática. Estas áreas de estudos correspondem ao campo de futebol e a praia próxima da Vila do Bonifácio. A identificação do lençol freático neste ambiente estudado foi clara, principalmente nos primeiros perfis do levantamento no que correspondem à praia. Foi possível verificar a presença da intrusão salina que devido ao elevado valor de condutividade elétrica, causou forte atenuação da onda eletromagnética e por este motivo pode ser mapeada.

Palavras-chave: Intrusão da cunha salina, Água subterrânea, Radagrama, Ground Penetrating Radar (GPR), Modelagem 3-D, Lençol freático, Onda eletromagnética.

ABSTRACT

In coastal areas, the problem of saline intrusion wedge often preclude the use of groundwater for public consumption, thus there is the need to accurately determine the interface of the freshwater / saltwater, in order to preserve quality of this groundwater resource to a balanced and sustainable development. The study of the shape, location and temporal variation of this interface is extremely important for exploitation of underground waters. The quality of these waters is highly susceptible to contamination by socioeconomic activities, use and occupation of the soil, causing contamination of aquifers, which is becoming increasingly common. Currently, a problem that is becoming somewhat common, is the total or partial salinization of these reserves, primarily in the coastal regions. In these regions the contamination is usually persistent, but the recovery of the quality of these waters is very slow and very difficult. So preserving the quality of these reservoirs is very important, forming a framework of ecological balance and sustainable source. In micro Bragantina, specifically in Vila dos Pescadores (NE Pará), we found a very precarious water supply. The residents of this village wells using Amazons style with a very shallow depth, allowing contamination by waste from septic tanks and saltwater intrusion. The use of geophysical methods is a quick and low cost for the environmental diagnosis of these regions. Through radagramas generated by Ground Penetrating Radar (GPR) and 3-D modeling of the two study areas near the Vila dos Pescadores (Bragança, Pará), one can perform the mapping of this problem. These areas of study correspond to the soccer field and beach near the town of Bonifacio. The identification of the groundwater in this environment studied was clear, especially in the first survey of the profiles that match the beach. It was possible to verify the presence of saline intrusion due to the high value of electrical conductivity, caused strong attenuation of electromagnetic wave and for this reason can be mapped.

Keywords: Intrusion of saline wedge, Groundwater, Radagrama, Penetrating Ground Radar (GPR), 3-D Modeling, Groundwater, electromagnetic wave.

1 INTRODUÇÃO

A grande concentração de cidades ao longo da costa brasileira e o aumento do interesse pelas áreas próximas às praias para moradia ou lazer têm levado a um acentuado estresse dos recursos naturais das regiões litorâneas. Este é o caso das águas subterrâneas que estão submetidas a grandes riscos em função de sua vulnerabilidade e principalmente devido à super exploração que vem ocorrendo em diversos locais dos aquíferos costeiros (SILVA JR. et al., 2000; BOCANEGRA et al., 2007).

As águas subterrâneas atualmente constituem importante fonte de renda para a exploração, efetiva ou como reserva estratégica, local e regional, necessitando de conservação. Em virtude de sua localização, as águas subterrâneas são mais protegidas que as superficiais, apesar de que alguns contaminantes degradem sua qualidade e diminuem sua utilidade. Estima-se que para que ocorra contaminação abaixo da superfície terrestre, uma pluma contaminante, por exemplo, pode levar anos para poluir essa fonte. Esse lento transporte e o fato das águas subterrâneas e os poluentes não serem facilmente detectados, dificultam as ações localizadas na identificação e no controle de fontes poluidoras.

A qualidade dessas águas é bastante susceptível à contaminação por atividades socioeconômicas, uso e ocupações do solo, provocando a contaminação desses aquíferos, que esta se tornando cada vez mais comum.

Os aquíferos formam verdadeiros reservatórios de águas subterrâneas e raramente encontra-se em condições de equilíbrio (SOUSA PINTO, 1976). Para que haja a utilização apropriada deste reservatório de água, deve-se ser levado em conta o grande valor das águas subterrâneas por estocar e regular serviços ecossistêmicos, com isso se tem a necessidade que sejam feitos estudos preliminares para verificação do potencial de utilização e disponibilidade de água, de maneira tal que o sistema não sofra consequências negativas. Atualmente, uma problemática que está se tornando de certa forma comum, é a salinização total ou parcial dessas reservas, principalmente nas regiões litorâneas. Nestas regiões isso pode acontecer devido ao bombeamento inadequado e exagerado das águas subterrâneas que pode dar início ao processo conhecido como intrusão salina.

A contaminação nessas regiões geralmente é persistente, mas a recuperação da qualidade dessas águas é muito lenta e bastante difícil. Por isso a preservação da qualidade

desses reservatórios é bastante importante, formando um quadro de equilíbrio ecológico e de fonte duradoura.

Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA), a salinização tornou-se uma importante ameaça à qualidade dessas águas, especialmente em áreas de costa onde a extração dessas águas em taxas e modo inadequado resultou na intrusão da água do mar. Estudos mostram que o aumento do nível do mar provocado pelas mudanças climáticas também devem exercer impactos na qualidade de água de aquíferos costeiros, por facilitar a intrusão da água do mar.

Nas áreas costeiras, a problemática da intrusão da cunha salina muitas vezes impossibilita a utilização da água subterrânea para consumo público, com isso tem-se 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 para um desenvolvimento equilibrado e duradouro. O estudo da forma, localização e variação temporal desta interface é de extrema importância para exploração das águas subterrânea.

A questão da intrusão salina em aquíferos costeiros afeta grande parte das cidades litorâneas do mundo, que utilizam água subterrânea para abastecimento público (PAIVA, 2004). No caso da região costeira bragantina (PA), mas especificamente na Vila dos Pescadores, município de Bragança (NW do Pará, Brasil), a água utilizada pelos moradores deveria apresentar parâmetros em conformidade com a Portaria do Ministério da Saúde 518, de 25 de Março de 2004. Que estabelece nos incisos I e X do artigo 7º, que é dever das secretarias municipais de saúde exercer a vigilância da qualidade da água em sua competência, em parceria com os responsáveis pelo controle de qualidade de água. Contudo, a Vila carece de serviços e infraestruturas básicas, por exemplo, saneamento básico, água potável, escolas e melhor acesso (KRAUSE et al., 2000).

Com a falta de saneamento, os moradores da Vila mencionada anteriormente, recorrem a poços de estrutura tipo Amazonas (poços artesanais revertidos de madeira, com boca larga e profundidade inferior a 3 m) para obtenção de água.

Porém esta água não é própria para o consumo humano, sendo utilizada apenas nas utilidades domésticas e de higiene nos meses chuvosos, conforme relatos dos próprios moradores, pois já tem influência de água salgada. Mesmo fora de condições, alguns moradores ainda se utilizam das águas dos poços para consumo, sendo outro problema

que podemos reportar é a presença de fossas sanitárias próximos destes poços que também constituem um efeito contaminador destas águas subterrâneas.

A erosão nas praias bragantinas (PA), bem como o uso e ocupação do território adjacente a estas praias já foram visualizados em vários trabalhos podendo ser citados os trabalhos de KRAUSE e GLASER (2003); GLASER (2003); PEREIRA et al. (2006a,b); MONTEIRO et al. (2009). Entretanto, nenhum destes trabalhos procurou investigar a interface de interação entre a água doce e salgada em subsuperfície através da utilização de outros métodos (por exemplo: métodos geofísicos), a fim de determinar estes contrastes e verificar a existência do fenômeno de intrusão salina.

Para a obtenção de resultados satisfatórios nesse tipo de estudo de contaminação, podemos contar com ferramentas geofísicas bastante eficazes (métodos elétricos e eletromagnéticos, por exemplo) que apresentam uma eficiente resposta neste tipo de problemas (SOARES, 2007). Uma vez que as águas de subsuperfície são contaminadas, torna-se bastante custosa a sua remediação. No geral são bastante limitados os dados sobre qualidade de água subterrânea, isso devido ao alto custo de monitoramento e análises. Os métodos geofísicos são uma alternativa no diagnóstico de áreas contaminadas, devido à rapidez e baixo custo em estudos ambientais e podem auxiliar na detecção e no monitoramento destas, em conjunto com métodos diretos e de investigação (SANTOS et al, 2009).

Aquino et al. (1998) utilizaram a ferramenta geofísica do Geo-Radar na detecção de intrusão salina e na identificação de estruturas geológicas na Praia de Itaipu no município de Niterói (RJ). Como resultados acabaram por determinar a interface entre a água doce e salgada em pontos onde esta interface é controlada topograficamente pelo substrato argiloso, assim como o nível freático que em solo argiloso em geral é difícil de ser identificado, diferente dos arenosos ou ambientes constituídos unicamente por areia, onde o GPR fornece resultados bastante satisfatórios.

Dias et al. (2007) realizaram um estudo utilizando o método eletromagnético EM34-3 para determinar a influência da interface água doce-salgada na Vila do Bonifácio (Bragança-Pará), próxima da Vila dos Pescadores. Eles determinaram que os valores de condutividade elétrica não variam significativamente na maré alta e baixa, sugerindo que o movimento da cunha salina em direção a Vila do Bonifácio provocada pela variação de maré não afeta a água alcançada pelos poços Amazonas. Com isso estabeleceram que a

cunha salina pudesse ser encontrada a uma profundidade de 5m, não havendo comprometimento da água dos poços Amazonas.

Raiol (2008) definiu áreas mais promissoras para a exploração de água subterrânea, livres da intrusão salina, através da correlação de metodologias geofísicas (método Eletromagnético e o Slingran (EM34-3, Max Min I)) e geoquímicas, na Vila de Algodual /Ilha de Maiandeuá (Nordeste do Estado do Pará).

Este presente trabalho visa contribuir para um melhor entendimento da problemática da intrusão salina em áreas costeiras, visando à área de estudo (Vila dos Pescadores), através da aplicação do método GPR, com o auxílio da ferramenta da modelagem 3-D. Por se tratar de um local onde há constância populacional, torna-se necessário o estudo pioneiro utilizando essa metodologia, tendo como funcionalidade o demonstrativo desses resultados à população da região bragantina e população local para disparar um processo de conscientização ambiental entre eles e as respectivas autoridades do município.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho consiste em identificar a interface de interação água doce/salgada através da Modelagem 3D e determinar a profundidade do nível do lençol freático e a existência da problemática da intrusão salina através dos radagramas na Vila dos Pescadores, Bragança (Pará, Brasil).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

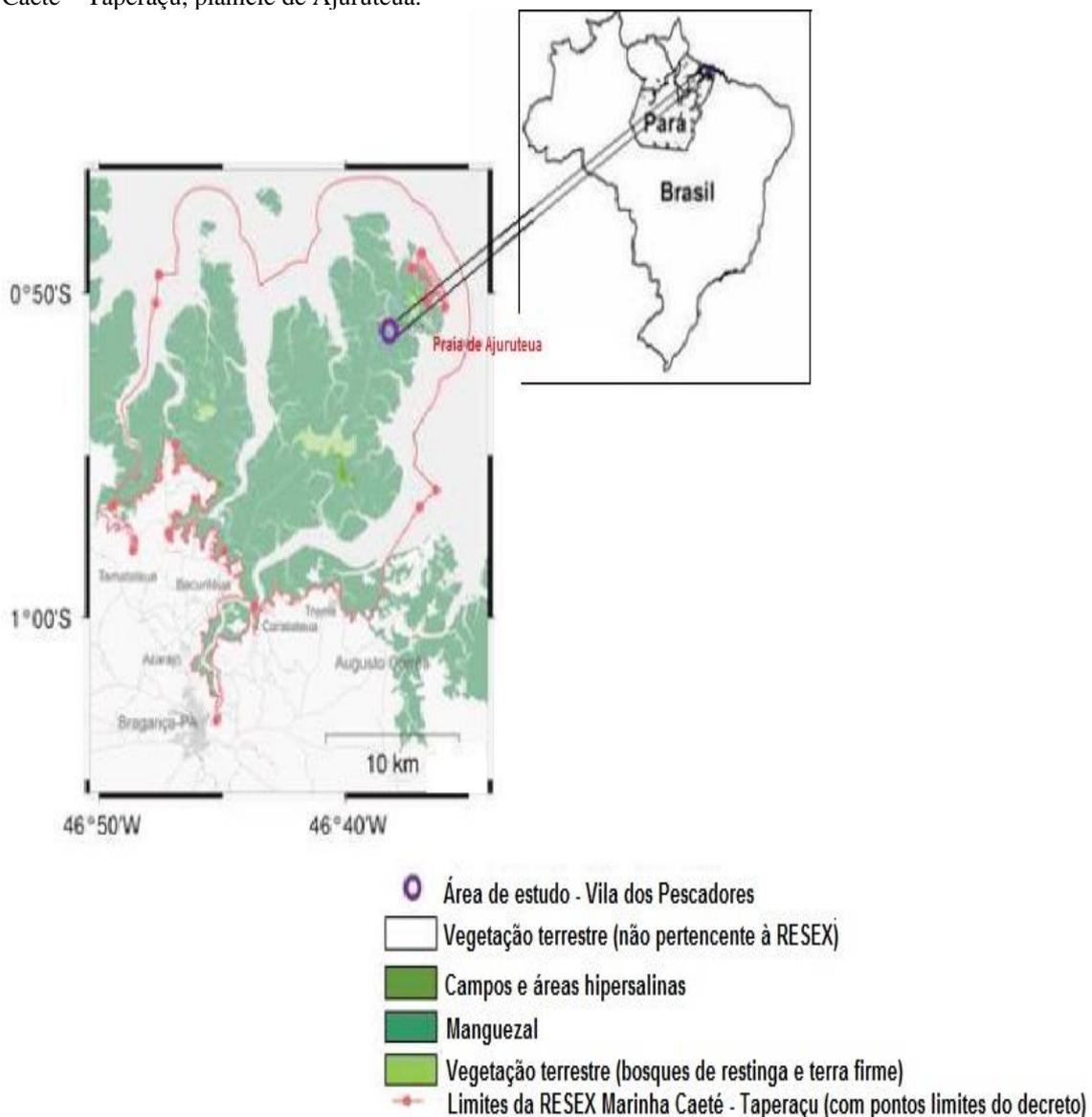
- Através de dados obtidos do Geo-Radar (seções de geo-radar ou radargrama) identificar a profundidade do lençol freático;
- Verificar a existência da intrusão salina no lençol freático, através de radagramas;
- Estudo da distribuição espacial através da modelagem 3-D, da camada do lençol freático e possível cunha salina presentes na área de estudo, com o auxílio do software de modelagem computacional GOCAD (Geological Object Computer Aided Design);
- Apresentação dos modelos 3-D estrutural e estratigráfico do estudo da problemática da área de estudo.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo fica próximo da Praia de Ajuruteua (NE do Pará) distando aproximadamente 34 km do município de Bragança – Pará, localizada na margem esquerda do estuário do Caeté, onde a mesma está dentro dos limites da RESEX Marinha Caeté – Taperaçu (Figura 1). O acesso pode ser feito tanto por via terrestre e marítima, levando-se aproximadamente 35 a 40 minutos por via terrestre saindo do município de Bragança pela PA – 458.

Figura 1: Área de estudo com delimitação da área e comunidades da Reserva Extrativista Marinha Caeté – Taperaçu, planície de Ajuruteua.



Fonte: Imagem adaptada de Oliveira (2010).

3.2 CLIMA

O clima da área é equatorial, quente e úmido. A temperatura média é de 26°C, podendo variar entre 20,4°C e 32,8°C e a umidade relativa do ar variam entre 80 e 91% (MARTORANO et al., 1993). Em geral o período seco é de agosto a dezembro, enquanto o chuvoso é de janeiro a julho. A precipitação média anual excede 2,545 mm (BARLETTA, et al., 2005). Na região predominam ventos alísios de NE, principalmente, entre os meses de dezembro e maio (SILVA, 1996).

3.3 REGIME DE MARÉS

A Vila dos Pescadores (Bragança, Pará) está compreendida dentro de uma região de macromarés semidiurnas, com suas maiores marés, principalmente no período chuvoso (janeiro até março). Nas marés de sizígia, a velocidade da corrente pode chegar a 1,5 m/s (COHEN et al, 1999).

3.4 GEOLOGIA REGIONAL

A região de Bragança foi desenvolvida sobre depósitos neógeno do Grupo Barreiras e da Formação Pirabas (Figura 2 e 3).

Figura 2. Indício do segmento da Formação Pirabas na Vila dos Pescadores (Bragança, Pará)



Imagem: Evandro Brito

Tais depósitos estão constituindo as plataformas costeiras do norte do Brasil, com falésias ativas e inativas. A planície costeira bragantina (NE do estado do Pará) está situada no litoral amazônico oriental. Apresenta 40 km de linha de costa, estendendo-se desde a Ponta do Macau até a foz do rio Caeté (SOUZA FILHO e EL – ROBRINI, 1996). Esta planície foi compartimentada em três domínios morfodinâmico distintos, segundo sua forma, natureza e vegetação dominante: (1) Planície Aluvial; (2) Planície Estuarina e (3) Planície Costeira (SOUZA FILHO, 1995; SOUZA e EL – ROBRINI, 1996), sendo este o mais extenso dos domínios morfológicos, abrangendo uma área de 615.7 km². É limitada a sul por falésias mortas de 1 a 2 m de altura, esculpidas no Planalto Costeiro e, a norte pela zona onde predominam os processos marinhos. É recortada pela planície estuarina. Seis unidades foram identificadas nesse domínio: Pântanos Salinos, Manguezais, Cheniers, Planície arenosa, Dunas costeiras e praias (SOUZA FILHO e EL – ROBRINI, 1996). A Vila dos Pescadores está situada sobre um chenier. À medida que o canal avança, as casas são desmontadas e transferidas para áreas mais interiores da planície costeira (CARNEIRO *et al*, 2010).

A praia próxima da Vila dos Pescadores é relativamente plana orientada na direção NW-SE com, cerca de, 2,5km de extensão e 0,3km de largura, apresentando um declive suave em direção ao mar (MONTEIRO, 2009). A arrebentação da onda é do tipo deslizante e o estado morfodinâmico (€) apresenta características dissipativas (ALVES e EL-ROBRINI, 2006), sendo submetida a condições hidrodinâmicas de alta energia, que resultam em uma grande dinâmica praial, favorecendo o processo de erosão e deposição de praias.

4 CONCEITOS GERAIS

4.1 ÁGUA SUBTERRÂNEA

A água subterrânea forma-se quando gotas de chuvas se infiltram no solo e em outras matérias superficiais não-consolidados, penetrando até mesmo em rachaduras e fendas do substrato rochoso (Figura 3). Ela é extraída pela perfuração de poços e bombeamento para a superfície. As camadas que armazenam e transmitem a água subterrânea em quantidades suficiente para o abastecimento são chamadas de aquíferos (PRESS *et al.*, 2006).

Figura 4. Formação das águas subterrâneas

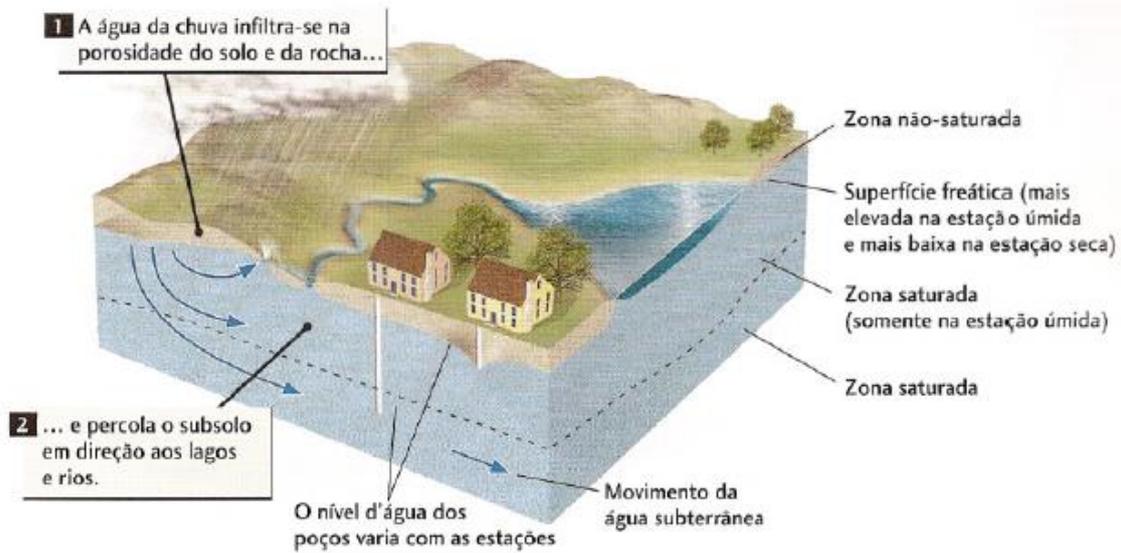


Imagem adaptada de Press et al. 2006

4.2 AQUÍFERO COSTEIRO

A fluidez da água subterrânea pode ocorrer em aquíferos confinados e não-confinados. Em aquíferos não-confinados a água percola através de camadas de permeabilidade mais ou menos uniformes, que se estendem até a superfície. O nível do reservatório confinado corresponde à altura da superfície freática (Figura 5).

Figura 5. Aquífero confinado.

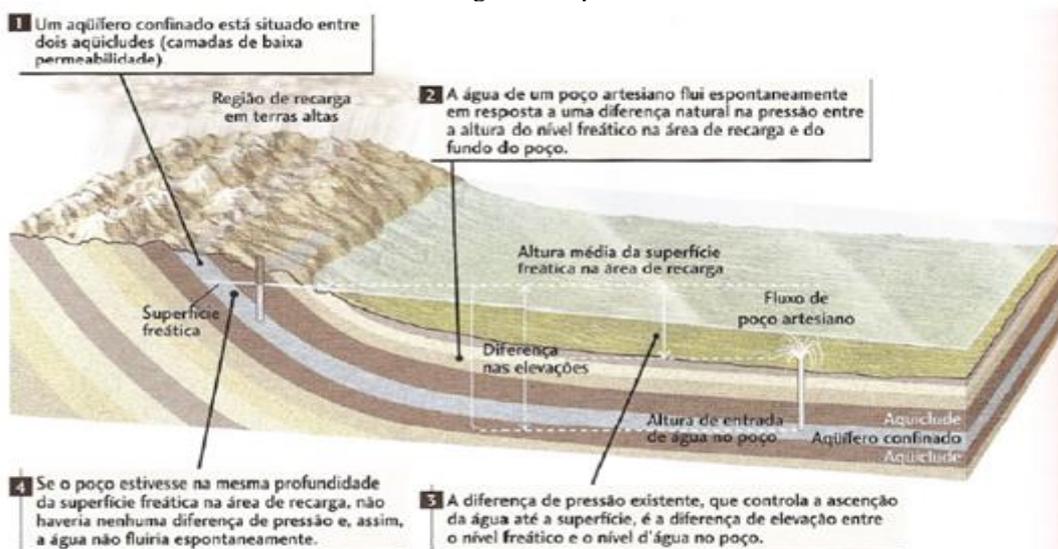


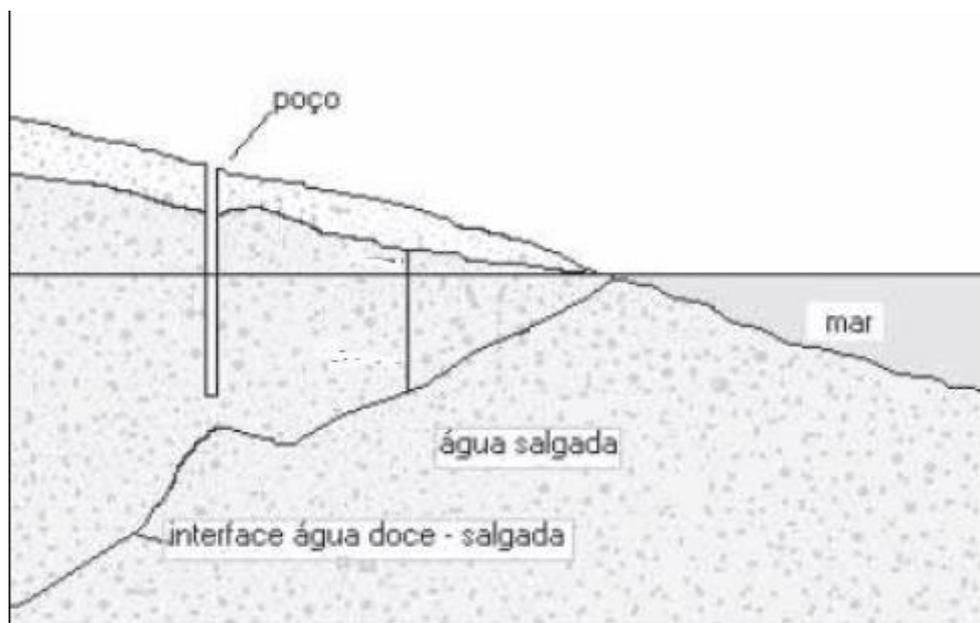
Imagem adaptada de Press et al. 2006

Muitos aquíferos permeáveis, tipicamente de arenitos, são conectados acima e abaixo por camadas de baixa permeabilidade, como folhelhos. Essas camadas relativamente impermeáveis são denominadas *aquicludes* e a essa água não pode percolá-los ou o faz muito lentamente, quando esses aquicludes situam-se tanto sobrepostos como sotopostos a um aquífero, forma-se o aquífero confinado (PRESS, et al 2006).

4.3 INTRUSÃO SALINA

A intrusão marinha, ou avanço da cunha salina é a forma de salinização mais conhecida e mais estudada que ocorre nas regiões costeiras. Na situação natural das regiões de costa que vêm sofrendo com a grande problemática da intrusão da cunha salina, ao ser contaminada pelas águas salgadas impossibilita a utilização dessas águas subterrâneas para o consumo humano. Este processo ocorre da seguinte forma: quando uma bomba está retirando água de um poço ela provoca o rebaixamento do nível freático ao redor do mesmo, formando um cone de depressão. A diminuição da coluna de água doce permitirá que a água salgada suba, de forma a equilibrar a pressão entre as duas. Se o bombeamento durar muito tempo ocorrerá uma intrusão de água salgada que contaminará o aquífero (SILVA e GOMES, 2007) (Figura 6).

Figura 6. Demonstrativo de um bombeamento causando intrusão de água salgada na zona de água doce.



Adaptada de Silva e Gomes (2007)

Na situação natural, antes de iniciar o bombeamento existe, um gradiente hidráulico no aquífero, que induz um fluxo de água doce em direção ao mar. Este fluxo natural de água doce mantém a cunha salina numa posição de equilíbrio. Quando é realizado um bombeamento excessivo da água continental, o equilíbrio se rompe e ocorre o avanço da cunha (ALMEIDA e SILVA JR., 2007).

Quando se reduz o nível estático ao nível do mar, bombeando continuamente, o poço fornecerá água salgada. Naturalmente, quanto mais profundo o poço, mais cedo ele será afetado pela água salina. Nestes casos é aconselhável que o poço trabalhe em um regime de bombeamento intermitente, de forma a permitir a recomposição do sistema, mantendo a água salgada longe do fundo do poço (SILVA e GOMES, 2007).

O avanço da cunha salina ocorre quando a cunha do mar avança ou se mistura com as águas doces do aquífero (CRUZ e SILVA JR., 2006). As águas do mar e das lagunas hidráulicamente conectadas com o oceano infiltram-se pelo subsolo e caminham em direção ao continente. A água doce, menos densa que a água salgada, flutua por sobre a água salina delimitando uma interface difusa denominada zona de mescla. O estudo da forma, posicionamento e variação temporal desta interface são de extrema importância para preservação das águas subterrâneas.

No contato entre a água doce e salgada pode haver alguma mistura, principalmente pela dispersão de escala micro e macroscópica. Assim, para que haja o equilíbrio na zona de interface, ocorre uma pequena entrada do fluxo de água salgada para dentro do aquífero de água doce. Esta entrada produz uma perda de carga ao longo da zona de mescla e a diminuição da profundidade teórica que ocorreria para uma interface entre líquidos imiscíveis.

A mensuração das propriedades físico-químicas das águas subterrâneas em aquíferos sujeitos ao fenômeno da intrusão marinha é de grande valia na interpretação fenomenológica deste tipo de corpo hídrico, auxiliando na avaliação da dinâmica da intrusão e de sua intensidade, tendo sido utilizada em todo o mundo nesse tipo de estudos (APPELO e POSTMA, 2005).

Os mecanismos responsáveis pela intrusão salina são classificados em três categorias. A primeira envolve a redução ou a reversão dos gradientes de água subterrânea, que permite que a água salina mais densa desloque a água doce. O segundo mecanismo é proveniente da destruição de barreiras naturais que separam água salina e

água consumível (fresca) e o terceiro mecanismo ocorre onde há disposição de resíduos de água salina no subsolo (TODD, 1980).

5 MÉTODOS

Neste trabalho foram aplicados dois métodos: o Ground Penetrating Radar (GPR) e a Modelagem 3-D. Os mesmos serão detalhados a seguir.

5.1 GROUND PENETRATING RADAR

O Método do Radar de Penetração no Solo ou Geo-radar (Ground Penetrating Radar ou GPR) consiste na radiação de ondas eletromagnéticas a partir de uma antena transmissora colocada às proximidades da superfície do terreno, as quais se propagam nos materiais da subsuperfície, sofrendo reflexão, refração e difração. As ondas refletidas que retornam à superfície são detectadas na mesma antena transmissora ou em outra antena colocada próximo. Durante o registro dos dados, a cada posição de aquisição no perfil é associado um traço (ou *scan*) que representa a aquisição do sinal no tempo. Assim, o registro final decorrente de um pulso de radar é uma curva de amplitude versus tempo de chegada, com uma escala de tempo da ordem de nano segundos (ns), chamada de *scan*. A representação gráfica dos diferentes traços (*scans*) obtidos em cada ponto durante o levantamento, um paralelo ao outro, forma uma imagem dos refletores no subsolo chamada de radargrama (LUIZ, 2012), como se observa na Figura 7.

Figura 7 - Representação esquemática da aquisição de dados de GPR.

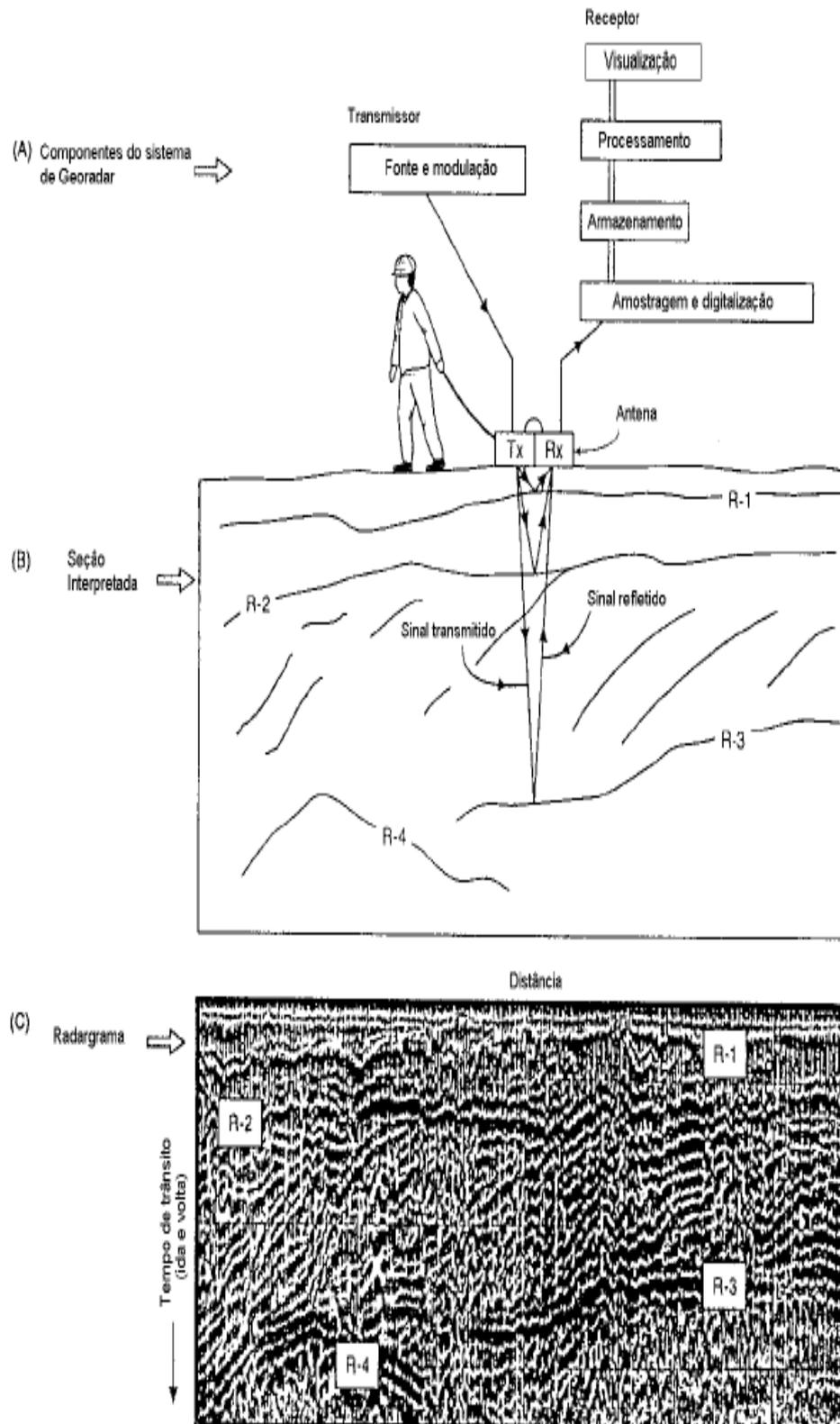


Figura adaptada de Reynolds (1997).

O método GPR é fundamentado na propagação de ondas eletromagnéticas de altas frequências, na faixa de 10 MHz a 2,5 GHz (DAVIS e ANNAN, 1989). Além disso, cada frequência corresponde aproximadamente a uma profundidade de investigação (Tabela 1), que por sua vez, depende do meio geológico e do objetivo do levantamento.

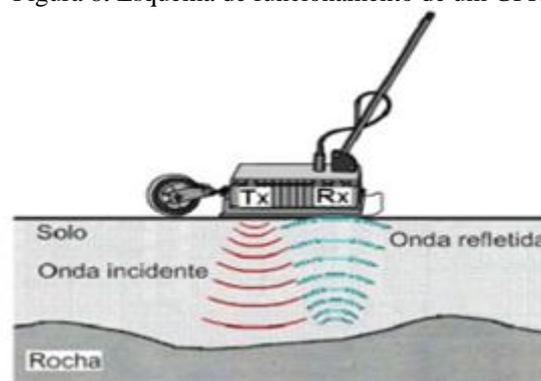
Tabela 1: Estimativa da profundidade de penetração das ondas eletromagnéticas do GPR, de acordo com a frequência utilizada.

| Frequência (MHz) | Profundidade Máxima de Penetração (m) |
|------------------|---------------------------------------|
| 1000 | 1 |
| 400 | 2 |
| 200 | 4 |
| 100 | 25 |
| 50 | 30 |
| 25 | 40 |
| 10 | 50 |

Fonte: Imagem adaptada de Porsani (1999).

O GPR é formado por uma caixa de controle ou gerador de pulso eletromagnético, uma antena de emissão (Tx), uma antena de recepção (Rx) e uma unidade de controle para armazenamento de dados de sondagem (datalogger) (Figura 8) (PINTO, 2010). Diferença nas propriedades eletromagnéticas dos materiais atravessados (permissividade dielétrica, susceptibilidade magnética condutividade elétrica) permite interferências sobre a estratigrafia do subsolo raso, bem como de determinações de contrastes litológicos e condições de umidade do solo (Figura 8).

Figura 8. Esquema de funcionamento de um GPR.



Fonte: Pinto, 2010.

Os sinais de radar são registrados digitalmente em nanossegundos (ns), representativos do intervalo de tempo entre o momento de emissão da onda até seu retorno. A profundidade de investigação atingida por este método é, em média, de cerca de 10 a 15m, porém profundidades de penetração de até 50 m são possíveis em áreas com materiais de baixa condutividade. A resolução vertical atingida depende da profundidade de investigação, podendo ser aumentada com a elevação da frequência da antena, o que induz na diminuição do sinal (DAGALLIER, 2000 apud ROSSETTI et al., 2002).

Um fator importante que deve ser considerado durante a aquisição dos dados é o espaçamento entre as antenas, Tx e Rx. O espaçamento, aliado a frequência e as propriedades do meio, determina a profundidade de investigação do método GPR. O espaçamento varia de acordo com o tipo de arranjo das estações para aquisição de dados. De um modo geral o valor estimado para o espaçamento entre as antenas deve ser cerca de 20% da profundidade do alvo (DAVIS e ANNAN, 1989).

Outro fator importante que deve ser enfatizado é a resolução do GPR, tanto vertical como horizontal. A capacidade de resolução é primariamente dominada pelo comprimento de onda λ , sendo o limite de $\frac{1}{4} \lambda$ a menor distância perceptível. No caso da resolução vertical isso se aplica à capacidade de discriminar dois eventos distintos em profundidade (Tabela 2). Já a resolução horizontal pode expressar tanto a capacidade de identificar a continuidade lateral de um ou mais eventos, quanto à diferenciação destes ao longo das imagens do GPR (DAVIS e ANNAN, 1989; KNIGHT, 2001).

Tabela 2: Demonstrativo da resolução vertical teórica em função da frequência central das antenas.

| Frequência Central (MHz) | Resolução vertical Teórica (m) |
|--------------------------|--------------------------------|
| 200 | 0,125 – 0,25 |
| 100 | 0,25 – 0,5 |
| 50 | 0,5 – 1 |
| 25 | 1 - 2 |

Fonte: Imagem adaptada de Porsani (1999).

5.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento de dados GPR compreende as seguintes etapas:

1. Importação dos dados: Este primeiro procedimento consiste na importação dos dados adquiridos nos levantamentos de campo e na criação de um projeto.
2. Edição dos dados: Nesta etapa são inseridas no programa REFLEXW versão 5.5 as informações do cabeçalho para uma pré-programação, tais como frequência da antena, direção e dimensão do perfil.
3. Interpolação das marcas: Consiste na interpolação dos dados na direção do perfil, tendo como referência as marcas inseridas nos registros a cada metro para controle da posição das medidas.
4. Correção do tempo zero: Sua função é corrigir o efeito de desalinhamento em tempo, dos traços de um radargrama, provocados por saltos da antena durante a aquisição dos dados em campo, ocasionados por irregularidades presentes no terreno. A correção é realizada aplicando um deslocamento linear, para cima ou para baixo, nos traços do radargrama de modo a corrigir o desalinhamento entre traços adjacentes.
5. Dessaturação: Remove as componentes de baixa frequência (WOW) acopladas à amplitude da onda que originam saturações no sinal, impedindo que alguns refletores sejam perceptíveis no radargrama. Isso ocorre devido à existência do fenômeno indutivo da onda eletromagnética entre as antenas transmissora e receptora ou a saturação eletrônica do equipamento, causada pela onda direta no ar ou outras fontes externas de campo eletromagnético, tais como: casas, cercas metálicas, edifícios, árvores de grande porte, muros, torres de alta tensão, postes de iluminação, estações de rádio FM, antenas de micro-ondas, rádios transmissores, celulares e etc. (PORSANI, 2008).
6. Ganho: A amplitude do sinal GPR ao se propagar no solo decai exponencialmente, por esse motivo, objetos localizados a grandes profundidades são mais difíceis de serem identificados no radargrama. Uma forma de compensar esse decaimento é a aplicação de um ganho para que se possam intensificar as reflexões provenientes de tempo de propagação mais longos.

Há vários tipos de ganhos que podem ser aplicados em um processamento de dados GPR. Para esse trabalho será utilizado o ganho *Energy Decay* que consiste na aplicação de um ganho na direção do eixo do tempo para cada traço.
7. Filtragem temporal (1-D): Consiste em retirar do radargrama os ruídos ou reverberações para destacar o sinal de interesse, principalmente os que estão contidos na

parte inferior. Com este filtro é possível eliminar as frequências espúrias, que se encontra em faixas de altas ou baixas frequências e que eventualmente podem mascarar estruturas no radargrama.

8. Filtragem Espacial (2-D): Os filtros espaciais (2-D) realçam ou removem tipos de variações espaciais diferentes, atenuando ruídos provocados pelo deslocamento horizontal das antenas (PORSANI, 1999). Os filtros 2-D utilizados foram:

- *Background Removal*: este filtro (passa alta) foi utilizado objetivando remover as reverberações das antenas de baixa frequência e realçar os refletores pontuais e inclinados.

- *Running average*: este filtro atua efetuando uma média móvel em um número de traço escolhidos. Este filtro (passa baixa) foi empregado com o objetivo de enfatizar os refletores e a continuidade lateral dos refletores horizontais.

9. Migração: permite reconstruir uma imagem que melhor representa a subsuperfície. Consiste em reposicionar as reflexões aparentes (identificadas nos perfis GPR) em sua verdadeira posição em profundidade e colapsar as hipérbolas de difração em um ponto.

Como acontece na Sísmica, o sucesso da migração depende de uma boa estimativa do modelo de velocidades.

5.3 MODELAGEM 3D

A modelagem refere-se a qualquer método matemático utilizado para produzir um modelo unificado da topologia (interligação), a geometria (forma) e propriedades físicas dos fenômenos geológicos, que integra todos os tipos possíveis de dados (MALLET, 2002, ANDREINI et al., 2008).

5.3.1 Modelagem estrutural 3D

O modelo estrutural consiste de um conjunto de horizontes obtidos a partir de seções geológicas interpretadas, que produzem um modelo estruturalmente coerente de relações geométricas de uma camada e as fronteiras geológicas.

Para a construção do modelo estrutural 3-D são consideradas as seguintes etapas (GOCAD, 2008):

1. Importar as imagens de cada seção geológica ou radargrama interpretada como objetos Voxets.
2. Digitalizar cada refletor a partir de pontos em todas as seções anteriores.

3. Criar limites (ou curvas fechadas) a partir do conjunto de pontos digitalizados para cada refletor (etapa 2).
4. Construir uma superfície correspondente a cada interface das etapas 2 e 3.

5.3.2 Modelagem estratigráfica 3D

O modelo estratigráfico é composto por um conjunto de camadas litológicas obtidas a partir dos horizontes do modelo estrutural 3D (etapa anterior).

As etapas para a construção de um modelo estratigráfico (GOCAD, 2008) são as seguintes:

1. Selecionar o método estrutural para construção da malha do modelo estratigráfico.
2. Selecionar o topo e a base dos horizontes.
3. Preparar os horizontes topo e base.
4. Associar os horizontes topo e base.
5. Limitar a malha da área de estudo.
6. Definir as unidades estratigráficas intermediárias.
7. Definir as camadas dentro das unidades estratigráficas.
9. Construir o modelo estratigráfico.

6 METODOLOGIA

Para o levantamento de dados GPR foi utilizado o equipamento GSSI SIR 3000, que conta com antenas de 80 MHz, 100 MHz, 200 MHz e 400 MHz. Neste trabalho utilizamos a antena de 200 MHz e a janela de 150. É importante a predefinição da janela, pois ela é válida apenas para seu trabalho, ou seja, as informações obtidas de acordo com a escala possuíram validade apenas para a mesma (KNIGHT, 2001). Todos os pontos dos perfis foram georreferenciados com GPS GARMIM 76, em UTM WGS 84.

Figura 9. Croqui da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores.

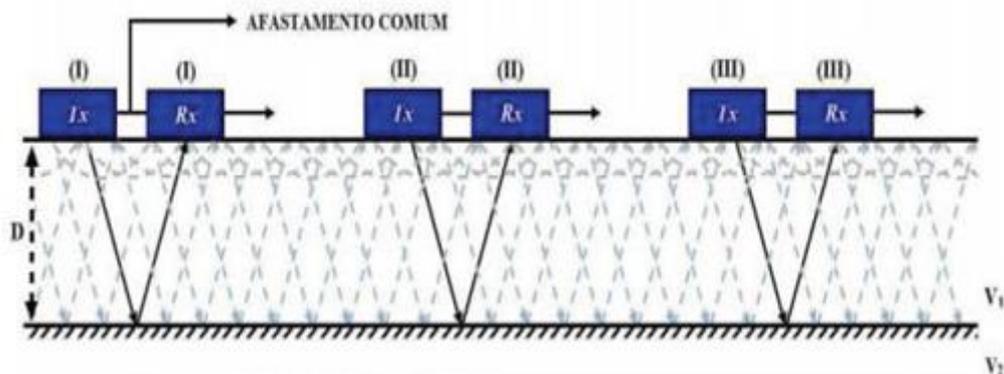


Imagem adaptada de Google Earth

6.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados GPR foi realizada utilizando a configuração afastamento comum (Common Offset), (Figura 10), (PINTO, 2010). Esta configuração caracteriza-se por apresentar o afastamento fonte-receptor constante. Os dados obtidos nessa geometria são transportados ao longo de uma linha com espaços regulares. As vantagens na aplicação deste método em estudos ambientais residem na possibilidade de execução de perfis contínuos e com alta resolução, facilidade na aquisição de dados, realização de medidas com diversas frequências e versatilidade do equipamento em campo.

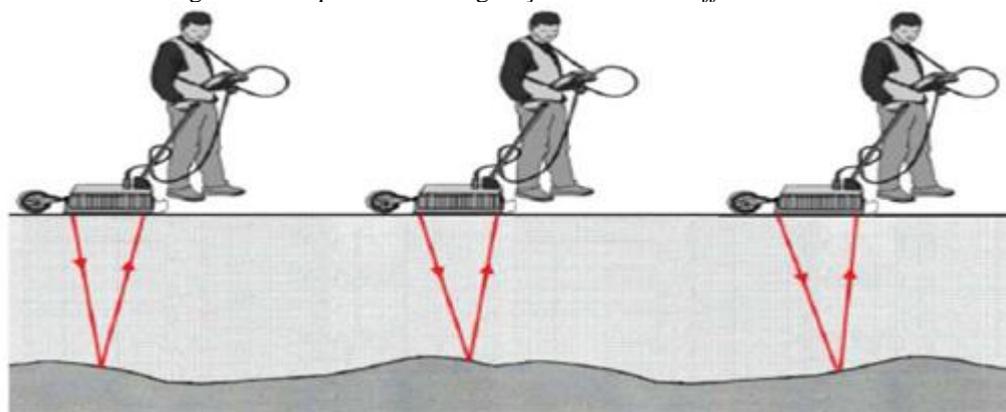
Figura 10: Técnica de aquisição com GPR: Afastamento Common - Offset.



Fonte: Imagem adaptada de Reynolds (1997).

Os perfis de reflexão com afastamento comum são os mais comuns em levantamentos GPR (Figura 11). A técnica consiste em manter as antenas de transmissão e recepção separadas em uma distância constante e transportadas ao longo de uma linha com espaçamentos regulares (PINTO, 2010). Neste trabalho, os espaçamentos foram feitos a cada 10 metros.

Figura 11. Esquema da configuração *Common - Offset*



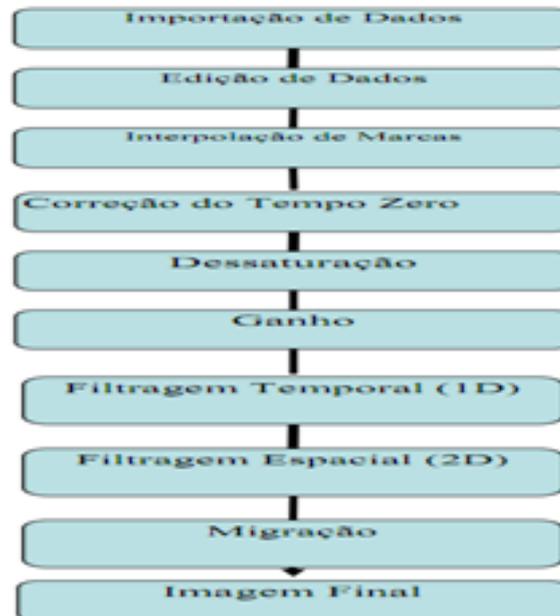
Fonte: Pinto, 2010.

6.2 PROCESSAMENTO

As etapas que foram adotadas no processamento de dados para construção deste trabalho, tiveram como propósito destacar os refletores contidos em subsuperfície, reduzindo as interferências provocadas pelo ar, onda direta do solo, e as interferências causadas por estruturas que possam interagir com o fluxo eletromagnético. Para realização do processamento dos dados, foi utilizado o software REFLEXW versão 5.5.

As etapas realizadas no processamento dos dados são apresentadas no fluxograma (Figura x), a seguir:

Figura 12. Fluxograma com as etapas do processamento de dados.



6.3 INTERPRETAÇÃO DE DADOS

Nesta etapa do trabalho foram realizadas as análises dos dados processados obtidos pelo método Ground Penetrating Radar (GPR), conhecidos como radogramas ou seções de geo-radar.

Durante a interpretação dos dados, foi possível identificar a profundidade de ocorrência do nível do lençol freático e baseado em experiências de outros trabalhos científicos, foi possível determinar a interface água doce/salgada, assim como o efeito da intrusão salina na área de estudo.

6.4 MODELAGEM

Nesta parte deste trabalho foram construídos os modelos estruturais e estratigráficos 3D dos lugares escolhidos na área de estudo para se ter uma visão sobre a distribuição espacial da camada do lençol freático e da existência ou não da intrusão salina, a fim de constatar as “falas” dos moradores da Vila, o software utilizado para realização da modelagem foi o GOCAD (Geological Object Computer Aided Design).

A partir das seções geo-radar processadas, foi construído o modelo estrutural 3D de dois lugares escolhidos nesse estudo: a faixa de praia próxima da Vila e o antigo campo

de futebol dessa área. A escolha dos mesmos foi em função da acessibilidade na coleta dos dados, procedendo digitalizar cada refletor identificado em subsuperfície dos lugares escolhidos na área de estudo.

Este modelo 3D foi construído usando a estrutura de fluxo de trabalho do software GOCAD (Geological Object Computer Aided Design), chamado Structural.

Posteriormente estes refletores foram limitados através de uma curva fechada para estabelecer o limite estrutural de cada um deles. Finalmente foram construídas as superfícies que definiam os horizontes a partir das etapas anteriores (pontos digitalizados e limite, respectivos dos refletores).

A partir dos horizontes construídos no modelo estrutural, procedemos a construir o modelo estratigráfico. Primeiramente foi definido o topo dos radargramas, depois o nível do lençol freático, em seguida a base da intrusão salina e a base do radargrama. Com essas informações iniciamos o processo de construção do modelo estratigráfico 3D. O software anterior foi utilizado para construir este modelo.

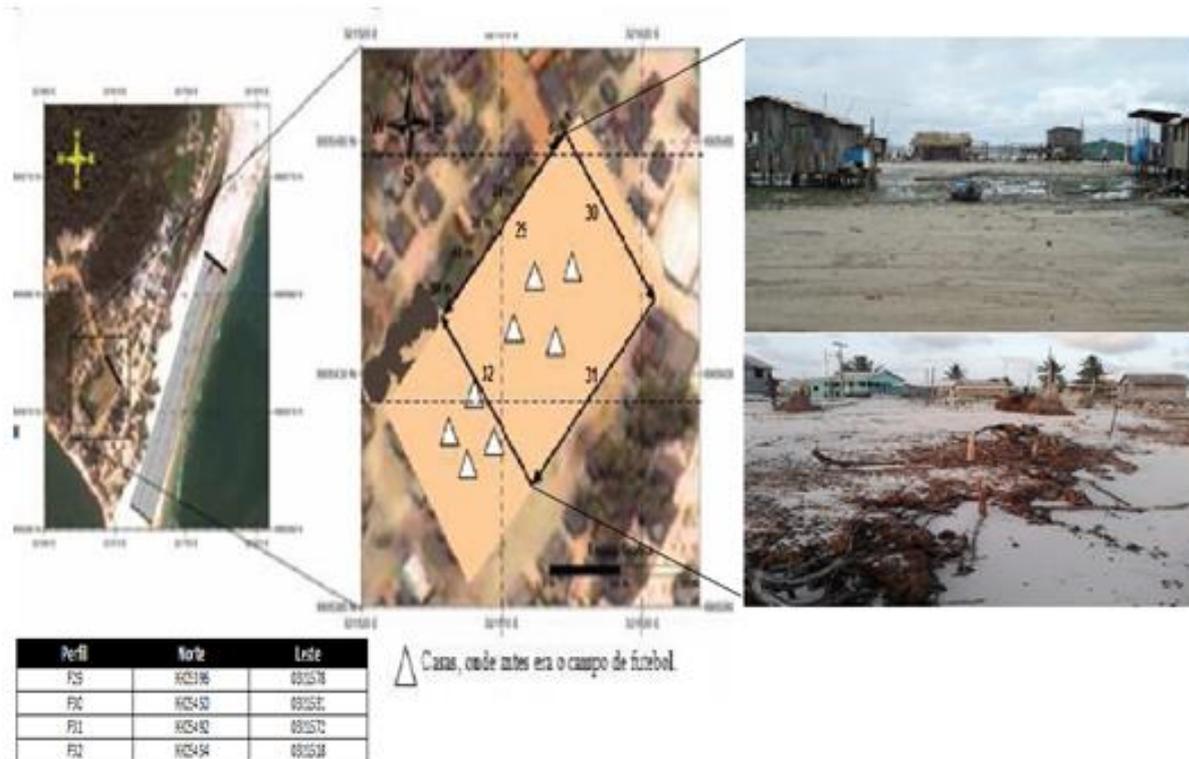
O modelo estratigráfico 3D foi construído usando a estrutura de fluxo de trabalho do software GOCAD (Geological Object Computer Aided Design), chamado Stratigraphic Bilder.

7 RESULTADOS

Para o levantamento dos dados geofísicos GPR, foram considerados dois lugares na área de estudo. O primeiro local corresponde ao campo de futebol da Vila (Período seco, época de verão) (Figura 12), sendo considerados os perfis laterais do referido campo em virtude de existir casas dentro do mesmo como consequência do efeito erosivo na praia (Figura 12).

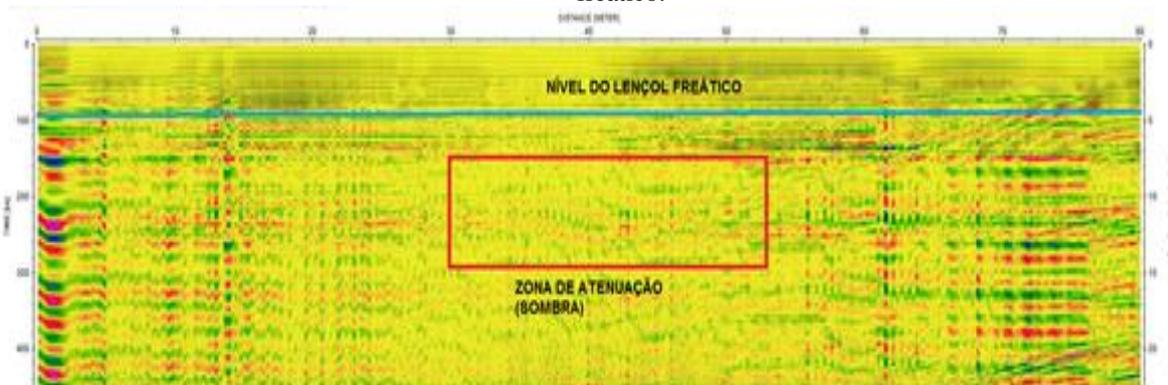
Este local antes era uma área improvisada de lazer para a população e atualmente é utilizada por fator emergencial de local de moradia para boa parte da população. Este fato aconteceu na época de março, verão do ano de 2011. Como segundo local de estudo considerou-se a praia próxima da Vila (Período chuvoso, época de inverno) (Figura 19). Nesta área o sentido dos perfis foi vertical à linha de costa, com o objetivo de monitorar melhor o possível efeito da água do mar na água doce. As coletas de dados foram realizadas nos meses de novembro de 2011 no campo de futebol (período seco, época de verão) e março de 2012 na praia próxima da Vila (período chuvoso, época de inverno), respectivamente.

Figura 13. Primeiro local de estudo correspondente a Vila Pescadores no ano de 2011 (período chuvoso, época de inverno). É apresentada a malha antes e depois da ocupação pelos moradores.



Os dados GPR levantados durante as coletas programadas foram processadas utilizando o software RFLEXW versão 5.5. Verificamos a presença da intrusão salina, pelo fato de apresentar uma zona de atenuação do sinal do radar, formando uma zona de sombra (Figura 14), devido à alta condutividade da água salgada, essa que é mais bem visualizada com a antena de 200 MHz, posto que a atenuação do sinal seja maior em frequências mais altas, informação esta que é de grande valia para o desenvolvimento desse trabalho, onde estamos utilizando uma metodologia similar.

Figura 14. Seção 30: Zona de atenuação, possível indicio da intrusão salina e presença do nível do lençol freático.



A partir dos radargramas gerados, processados e interpretados, foram encontrados indícios de que o lençol freático ocorreria a uma profundidade compreendida entre 4 e 5 metros nesta região, recebendo essa variação devido a topografia e formação geológica do local. O lençol freático no radargrama aparece como uma reflexão continua e ligeiramente forte (Figura 14).

As seções de geo-radar processadas e provenientes do antigo campo de futebol da Vila dos Pescadores (Figura 13), são apresentadas nas Figuras 15 a 18. Neste levantamento foi utilizada a frequência de 200 MHz. Estes dados foram coletados no período de novembro de 2011 (período seco, de verão). O nível do lençol freático foi bastante evidente nos primeiros perfis (Figuras 15 e 16) e o mesmo não é facilmente visualizado nos perfis restantes. Mas em compensação, o fenômeno da intrusão salina foi bastante notório no perfil N° 30 (Figura 16), onde zonas de atenuação foram bastante marcantes, principalmente na profundidade inferior a 5 m (Figura 16).

Figura 15. Perfil 29 do Campo de futebol da Vila dos Pescadores (Período seco, época de verão).

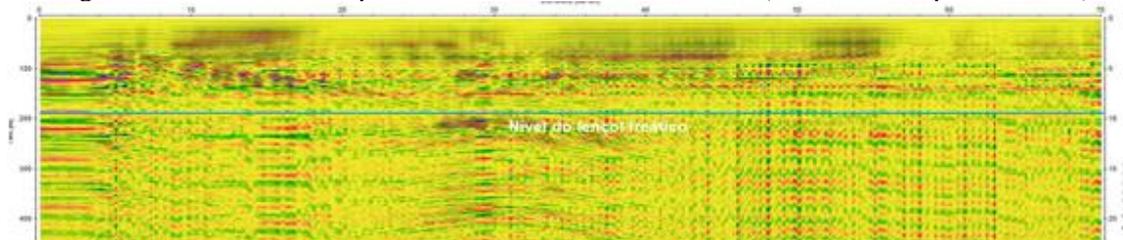


Figura 16. Perfil 30 do Campo de futebol da Vila dos Pescadores (Período seco, época de verão).

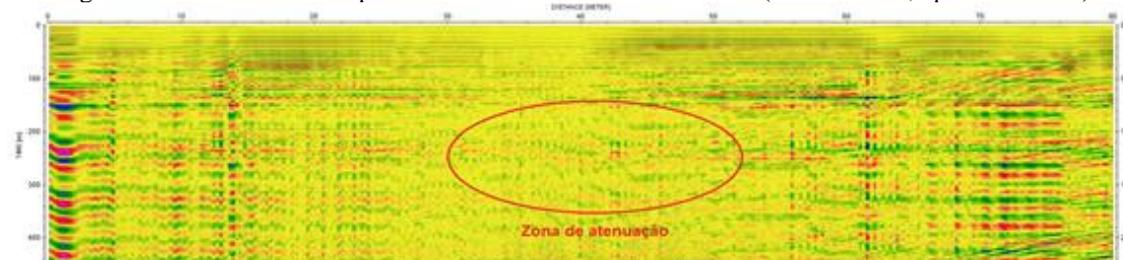


Figura 17. Perfil 31 do Campo de futebol da Vila dos Pescadores (Período seco, época de verão).

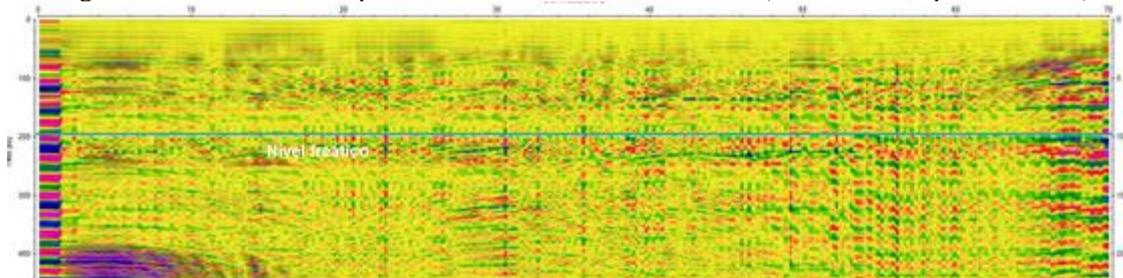
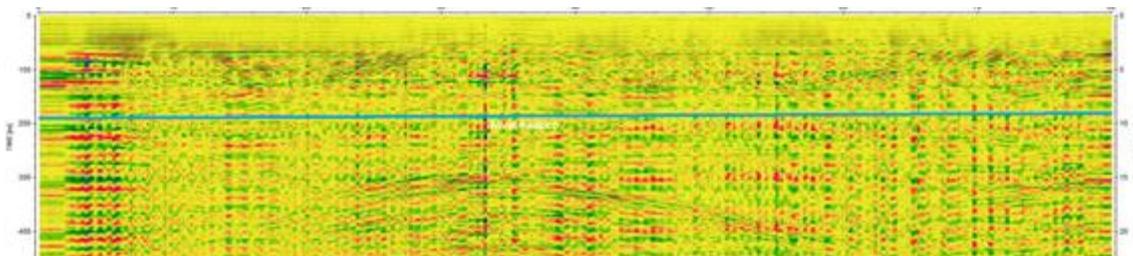


Figura 18. Perfil 32 do Campo de futebol da Vila dos Pescadores (Período seco, época de verão).



No segundo local de coleta, na praia próxima da Vila dos Pescadores, os dados foram coletados no mês de março de 2012 (período chuvoso, época de inverno). As seções geo-radar processadas e provenientes deste lugar (Figura 19), serão apresentadas nas Figuras 20 a 29.

Figura 19. Faixa de Praia próxima da Vila dos Pescadores (segundo local de coleta)



Foto: Evandro Brito

Nos perfis relacionados à faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores, foi possível notar principalmente no perfil 02 (Figura 20), uma linha contínua, na escala entre 4 e 5 m de profundidade. Nos radargramas 23 até o perfil 27, visualizamos um material com uma alta condutividade, mas ainda não podemos afirmar sobre o que se trata.

Isso pode ser um efeito conhecido com espelhamento, que no caso pode ser definido como uma leitura falha devido à presença de água no percurso da coleta, onde o equipamento não consegue a qualidade esperada. Como também isso pode ser o problema da presença de objetos ou mesmo resto de encanamentos, construções destruídas, por efeito erosivo ou pela maré de sizígia equinocial do ano de 2011 e 2012.

Para validar nossas sugestões precisaríamos perfurar um poço in loco, nos locais onde existe a possível contaminação, isso para confirmar nossa hipótese.

Desta forma, esta questão precisa ser mais bem investigada junto à população local para averiguar se é uma destas hipóteses. Caso não se comprove nada sobre esses indícios, uma saída para entender as imagens dos radargramas é perfurar poços in loco em pontos estratégicos, para confirmação de nossa hipótese.

Figura 20. Perfil 02 da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores, onde o possível nível freático é bastante evidente (Período chuvoso, época de inverno).

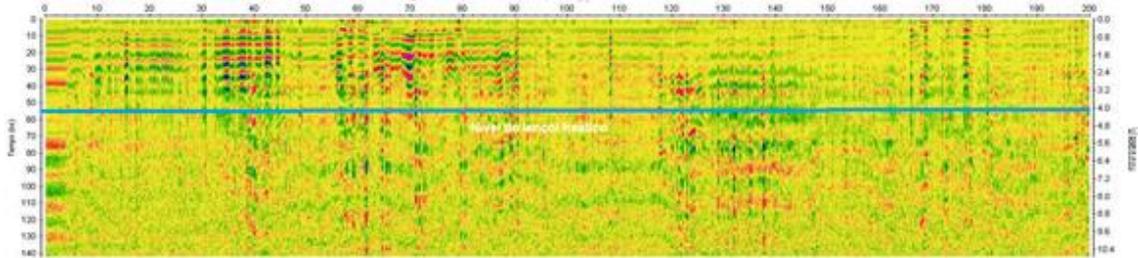


Figura 21. Perfil 03 da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores (Período chuvoso, época de inverno).

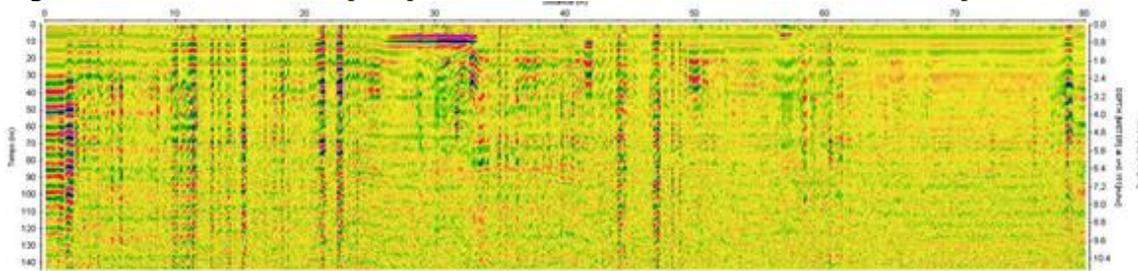


Figura 22. Perfil 04 da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores (Período chuvoso, época de inverno).

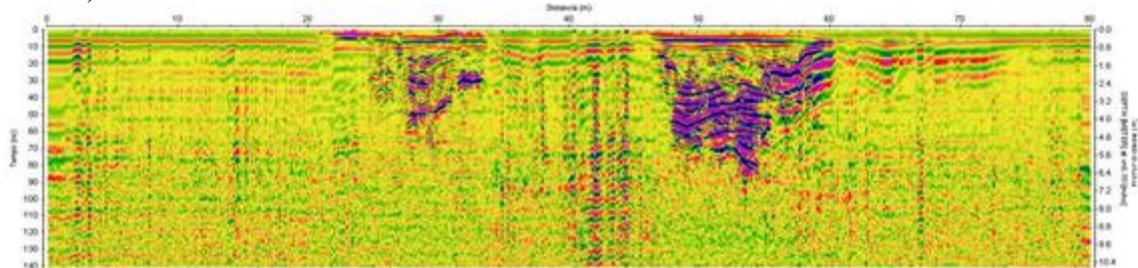


Figura 23. Perfil 05 da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores (Período chuvoso, época de inverno).

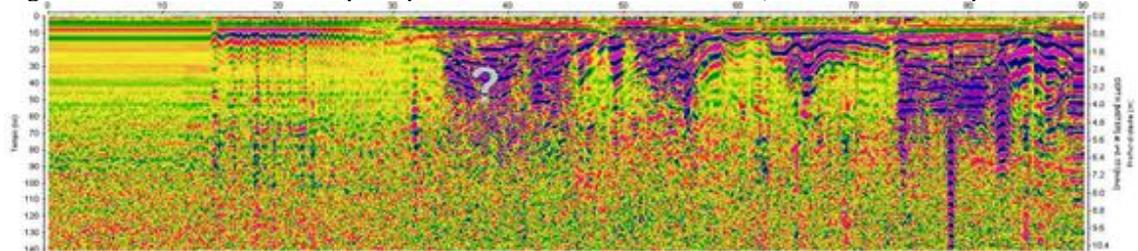


Figura 24. Perfil 06 da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores (Período chuvoso, época de inverno).

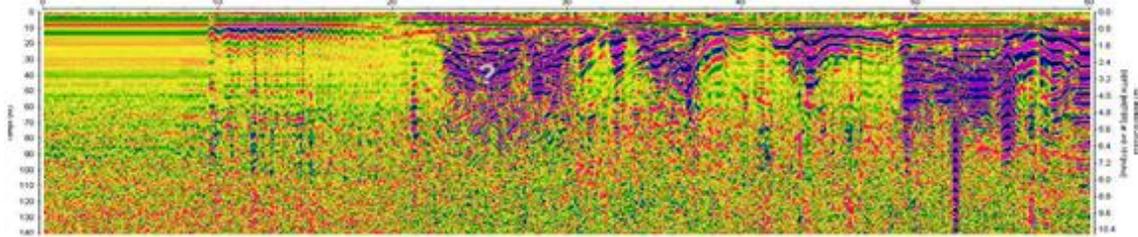


Figura 25. Perfil 07 da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores (Período chuvoso, época de inverno).

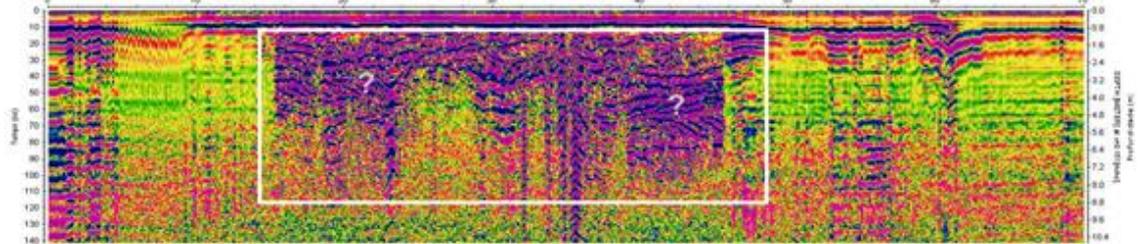


Figura 26. Perfil 08 da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores (Período chuvoso, época de inverno).

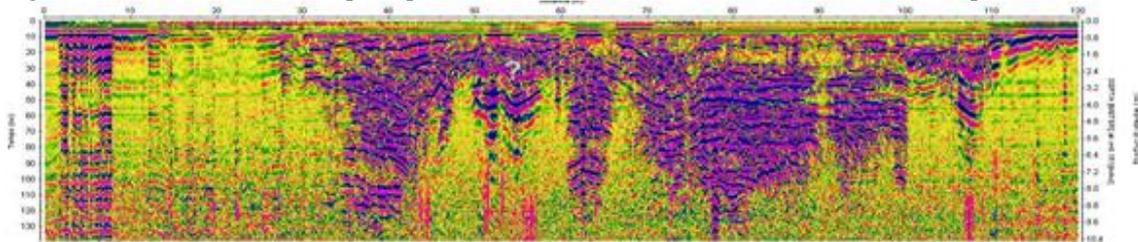


Figura 27. Perfil 09 da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores (Período chuvoso, época de inverno)

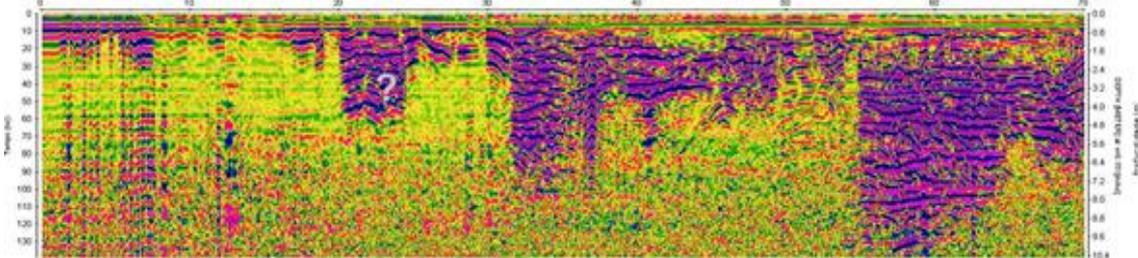


Figura 28. Perfil 10 da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores (Período chuvoso, época de inverno).

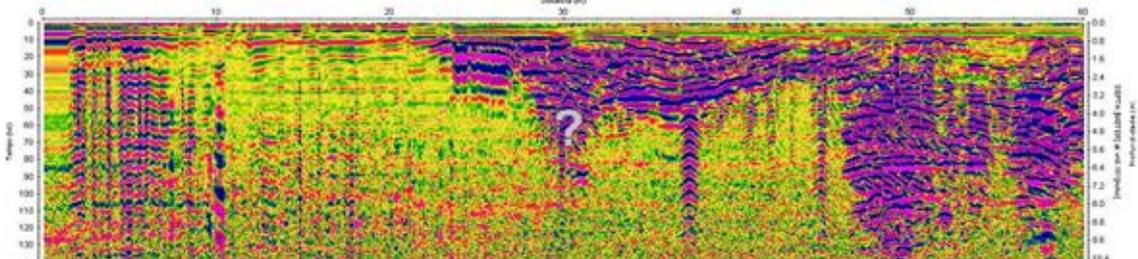
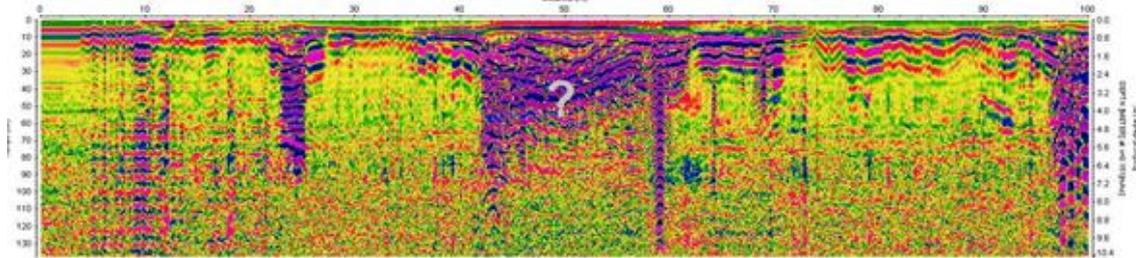


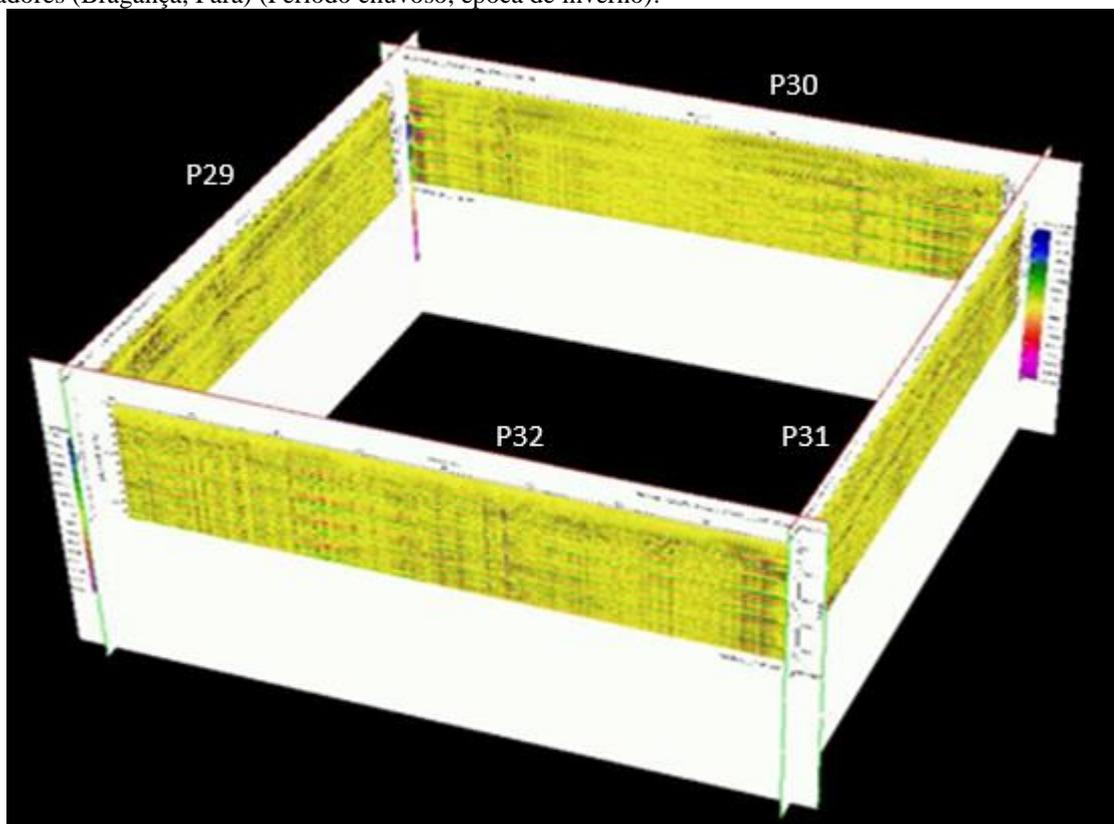
Figura 29. Perfil 11 da faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores (Período chuvoso, época de inverno).



Ao término das análises desses dados relacionados ao período seco no antigo campo de futebol (época de verão) da Vila (ano de 2011) e o chuvoso sendo referido a faixa de praia (época de inverno) próxima da Vila dos Pescadores (PA) (ano de 2012), tendo um resultado satisfatório levando em conta do pioneirismo do nosso método geofísico empregado.

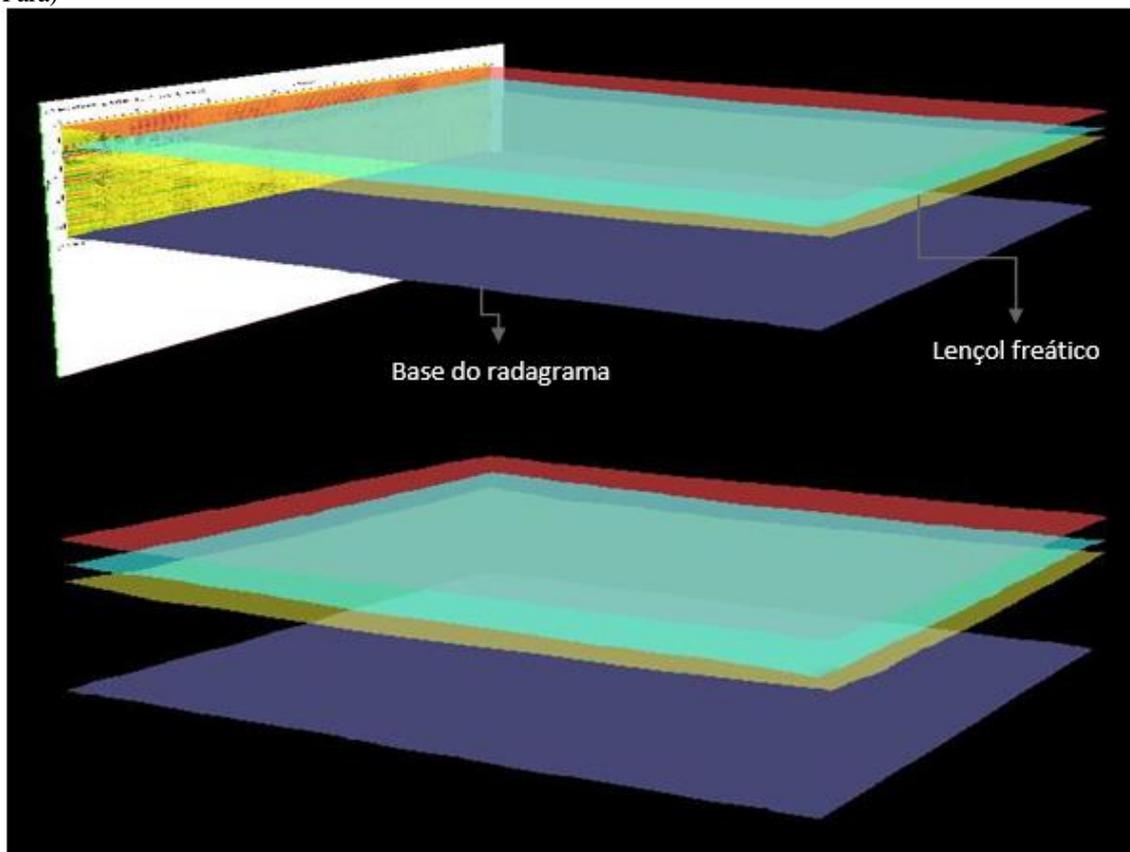
Com a finalidade de ter conhecimento sobre a distribuição espacial da subsuperfície na área de estudo, segundo os objetivos de nosso estudo procederam à construção de modelos 3D (estrutural e estratigráfico), tanto no Campo de futebol (Figura 30, 31 e 32) e na praia próxima da Vila dos Pescadores (Figuras 31, 32 e 33).

Figura 30. Visualização espacial das seções geo-radar 29 até 32, no campo de futebol da Vila dos Pescadores (Bragança, Pará) (Período chuvoso, época de inverno).



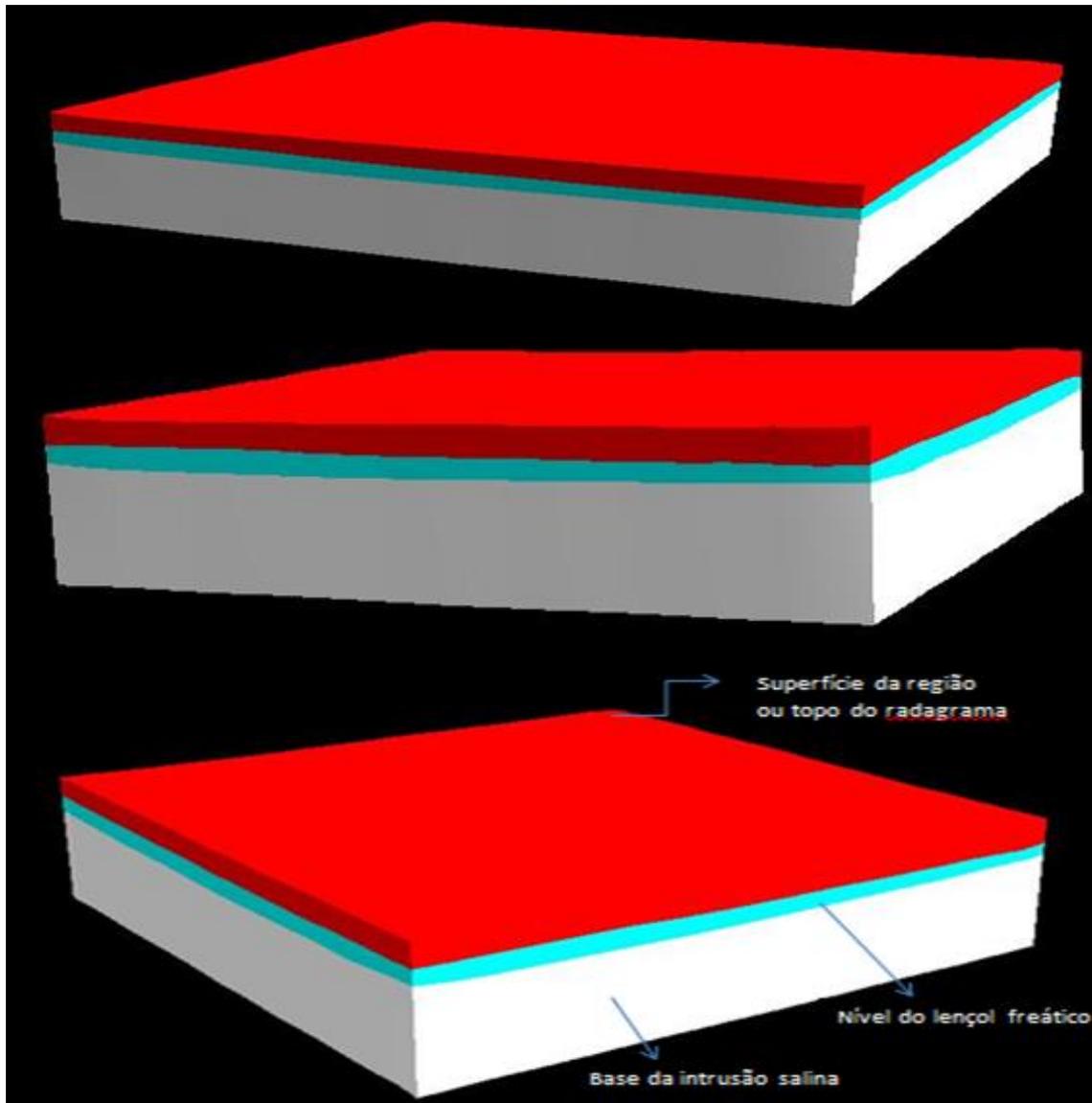
A partir dos radargramas interpretados e localizados espacialmente, procedeu-se com a construção do modelo estrutural 3D nesta área de estudo (Figura 31). Foram identificados o topo do lençol freático e a camada compreendida entre o lençol freático e a possível intrusão salina.

Figura 31. Modelo estrutural da área correspondente ao campo de futebol na Vila dos Pescadores (Bragança, Pará)



Posteriormente foi construído o modelo estratigráfico 3D (Figura 32), onde se encontra definido o topo do radagrama destacado na Figura 32, um representativo da superfície da região. O nível freático daquela região estudada pode ser identificado (Figura 31), o mesmo ocorreu com o demonstrativo espacial da base da intrusão salina e a base do radagrama, uma forma representativa da rocha.

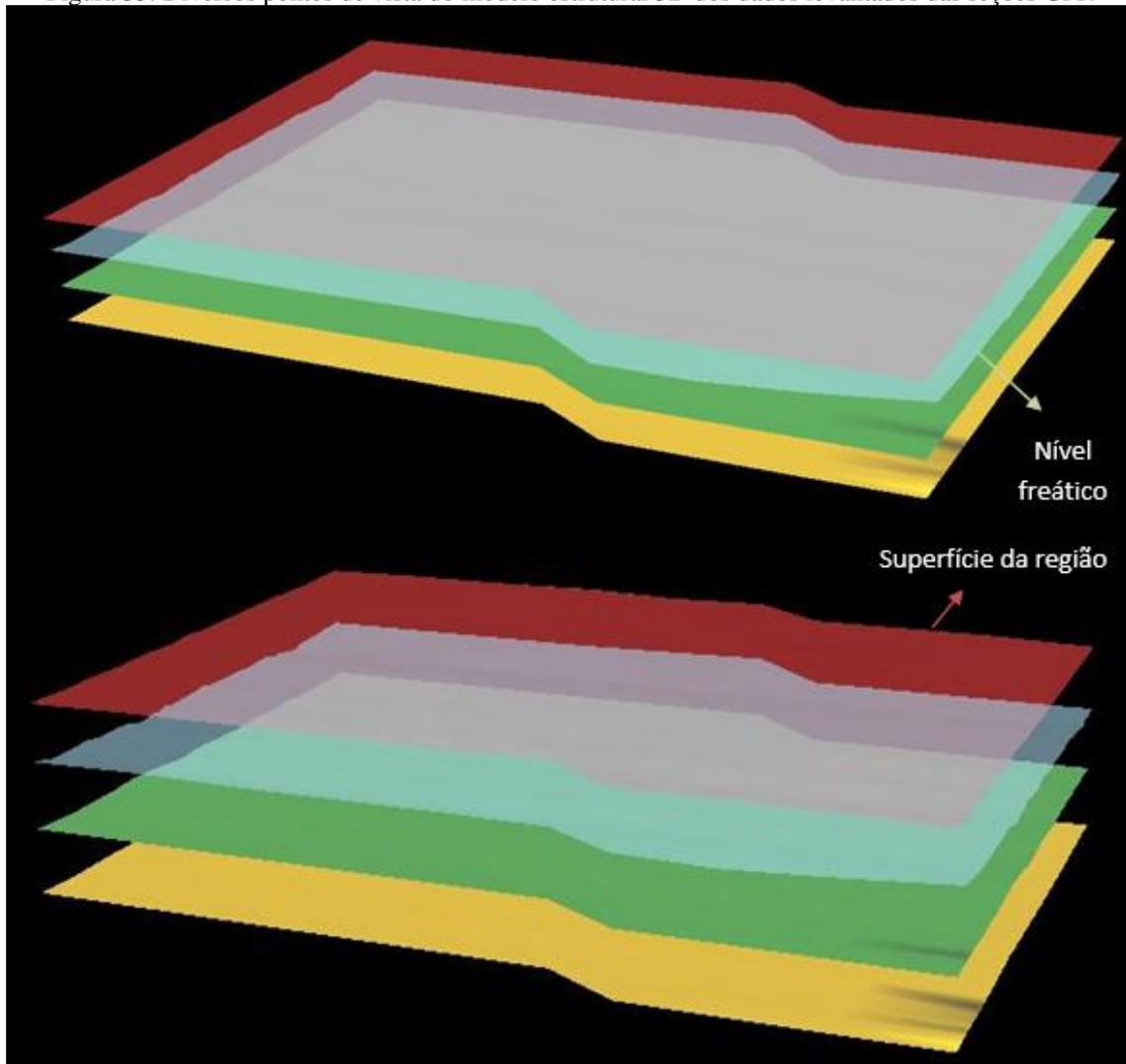
Figura 32. Diversos pontos de visualização do modelo estratigráfico da área correspondente ao campo de futebol na Vila.



Para a área correspondente à praia próxima da Vila, foi construído o modelo estrutural 3D (Figura 33).

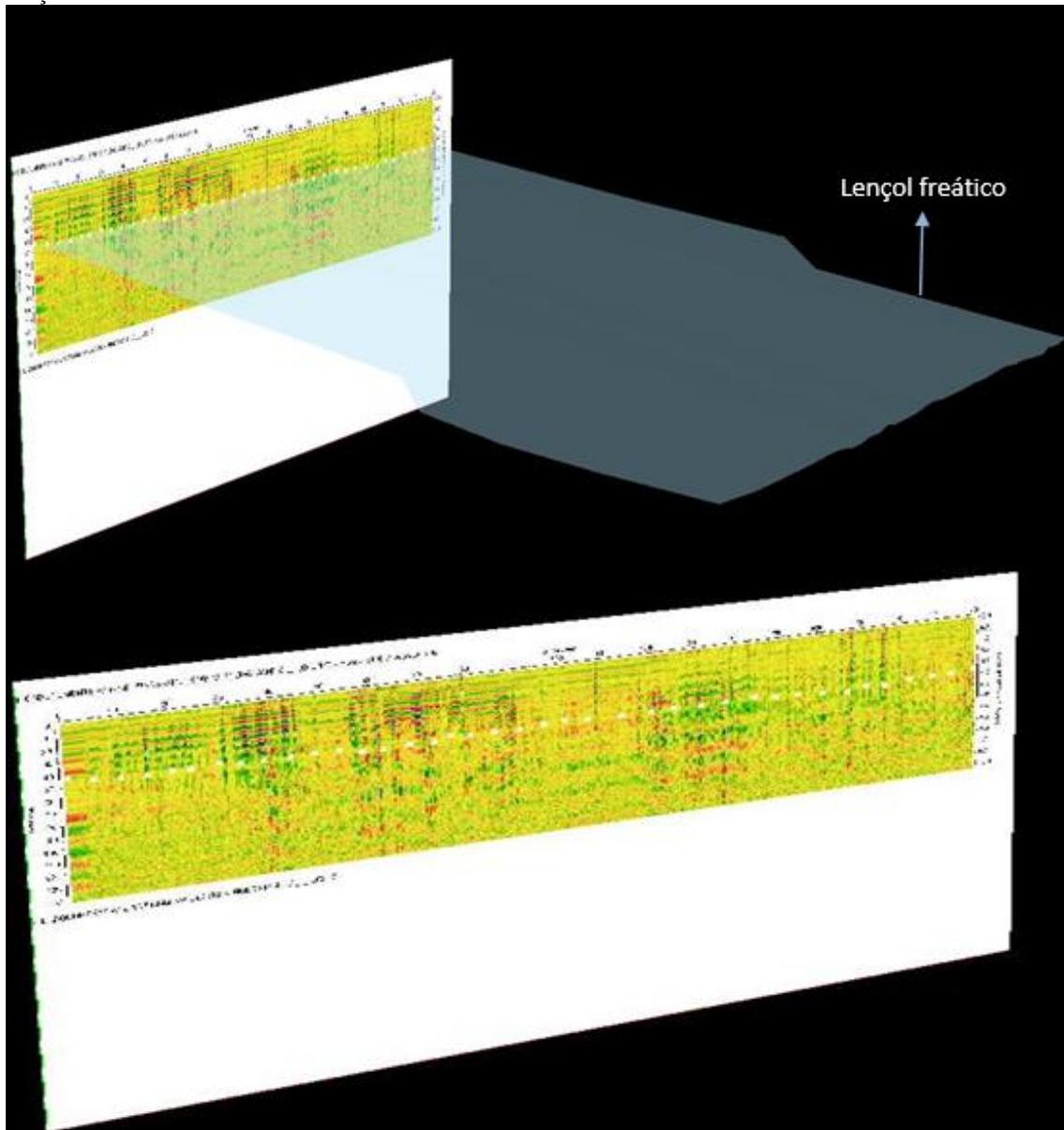
Posteriormente o modelo estratigráfico 3D, com destaque para o nível do lençol freático localizado a uma profundidade de 4 m (Figura 34) e determinar a interface água doce/salgada com a presença da intrusão salina (Figura 35).

Figura 33. Diversos pontos de vista do modelo estrutural 3D dos dados levantados das seções GPR



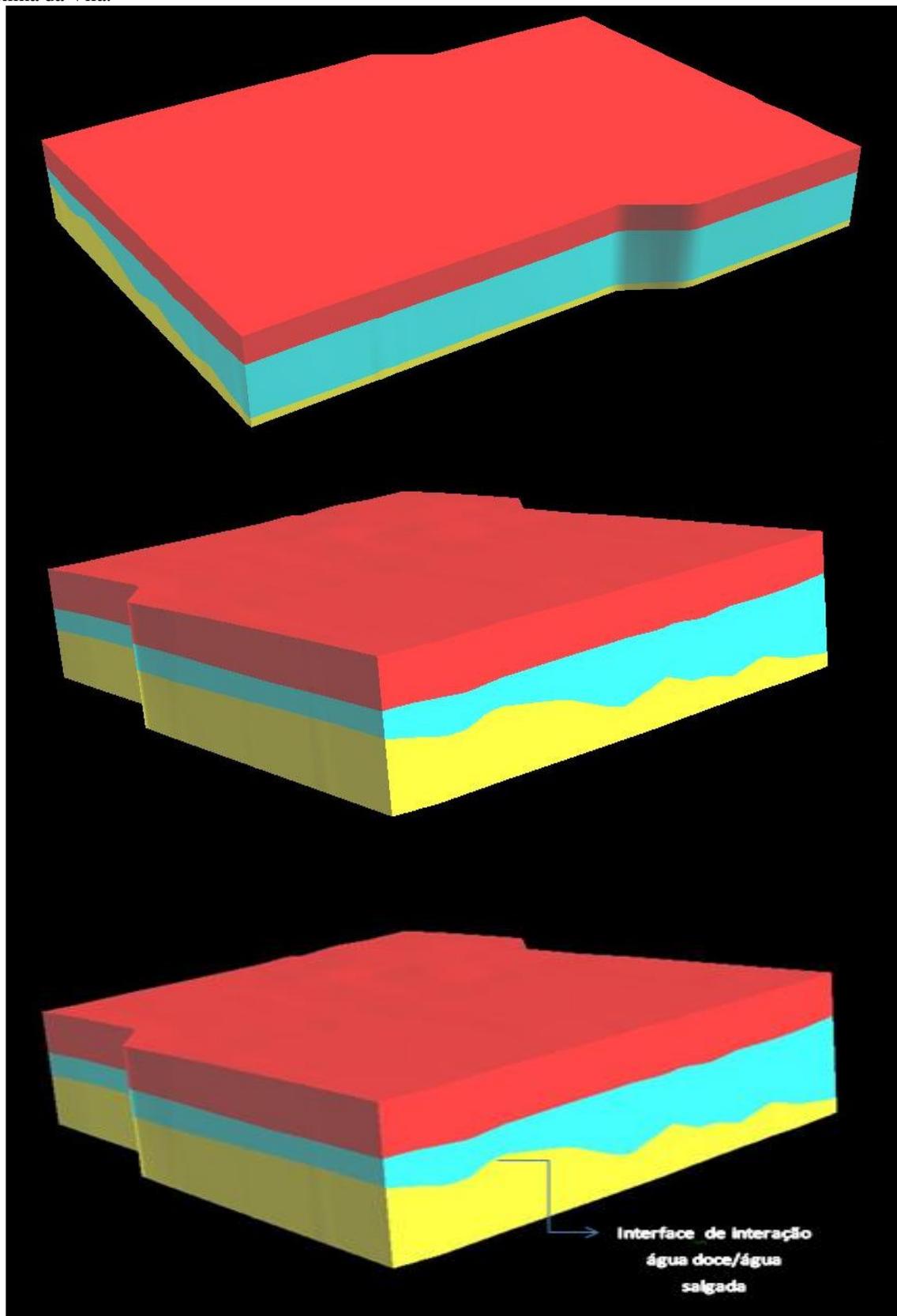
Nessa segunda área de estudo, principalmente nos primeiros levantamentos de GPR (Figuras 20 e 21), pode-se observar o topo do nível freático bastante evidente nos radargramas, assim como a digitalização para a construção das subsuperfície geológicas que representam o mesmo (Figura 34).

Figura 34. Identificação do topo do lençol freático e construção da superfície correspondente ao nível do lençol freático.



Posteriormente foi construído o modelo estratigráfico 3D (Figura 35), onde se encontra definido o topo do radargrama destacado na figura 33, um representativo da superfície da região. O nível freático dessa região estudada pode ser identificado (Figura 20), o mesmo ocorreu com o demonstrativo espacial da base da intrusão salina, onde observamos a cunha salina de uma forma acidentada, como demonstra o modelo estratigráfico (Figura 35).

Figura 35. Diversos pontos de visualização do modelo estratigráfico correspondente à área de praia próxima da Vila.



8 CONCLUSÕES

Este trabalho pioneiro visa contribuir para um estudo futuramente mais detalhado da problemática da intrusão salina, na região da península bragantina, mais especificamente na Vila dos Pescadores, Praia de Ajuruteua (Bragança, Pará).

Os métodos Ground Penetrating Radar e a modelagem permitiram estimar através de radargramas e da visualização 3D, a problemática da intrusão salina que está acontecendo na Vila dos Pescadores.

Apresentamos os modelos estruturais e estratigráficos de duas áreas próximas da Vila dos Pescadores (Bragança, Pará). Estas áreas correspondem ao campo de futebol e a praia próxima da Vila. Nas duas áreas em que foram feitos os levantamentos, os resultados obtidos demonstraram indícios de ocorrência da intrusão salina principalmente nos primeiros perfis correspondentes a faixa de praia próxima da Vila dos Pescadores. Neste trabalho a ocorrência do nível do lençol freático é de 4 a 5 m de profundidade e da intrusão salina na profundidade inferior a 5 m.

Afirmamos a presença da intrusão salina, devido ao fato de existir uma zona de atenuação do sinal do radar (formando uma zona de sombra), isso devido a alta condutividade da água salgada, essa que é melhor visualizada com a antena de 200 MHz, posto que a atenuação do sinal é maior em frequências mais altas, informação esta que é de grande valia para o desenvolvimento desse trabalho, onde estamos utilizando uma metodologia similar.

Ao término das análises desses dados relacionados ao período seco no antigo campo de futebol (época de verão) da Vila (ano de 2011) e o chuvoso sendo referida à faixa de praia (época de inverno) próxima da Vila dos Pescadores (PA) (ano de 2012), tendo um resultado satisfatório levando em conta do pioneirismo do nosso método geofísico empregado.

9 PERSPECTIVAS FUTURAS

- Aplicação de outros métodos geofísicos como, por exemplo, o EM-34 para verificar o valor de condutividade da água, como também a aplicação da geofísica de poço, perfis de poço são utilizados principalmente na prospecção do petróleo e de água subterrânea, onde poderíamos determinar a profundidade e a estimativa do volume do aquífero.
- Aplicação do método geo-elétrico da Eletroresistividade, onde podemos verificar a distribuição da resistividade na subsuperfície terrestre na direção vertical e horizontal.

- Coletas e análise de água dos poços da região estudada.
- Perfurar um ou dois poços artesianos para validar os métodos aplicados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

Andréini, J.-C., Bard, E., Bauquis, p.-R., Béraud, J.-J., Blazy, P., Cases, J.-M., Chaudison, M., Giafferi, J.-L., Marchand, A., Marty, B., Masset, J.-M., Poirier, J.-E., Pointet, T., Ricour, J., Samama, J.-C., Tisot, J.-P., Understanding the future: Gesociences. Ecole Nationale Supérieure de Géologie press. Editions Hirlé, Paris, 197 pp. 2008.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Brasília, (não publicado).

Almeida, G. M.; Silva, G. C. J. Fatores Hidrogeológicos no Estudo da Intrusão Salina em Aquíferos Costeiros da Região Litorânea do Município de Maricá-RJ. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, 2007.

Alves M.M., EL-Robrini, M. Morphodynamics of a Macrotidal Beach: Ajuruteua, Bragança North Brazil. Journal of Coastal Research. SI39:949-951. 2006.

Appelo, C. A. J.; Postma. D. Geochemistry, Ground water and Pollution. 2005

Aquino, W. F., Botelho, M. A. B., Gandolfo, O. C. B.. Emprego de geo-radar na detecção de intrusão salina e na identificação de estruturas geológicas em áreas litorâneas. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1998.

Barletta, M., Barletta-Bergan, A., Saint-Paul, U., Hubold, G. The role of salinity in structuring the fish assemblages in a tropical estuary. Journal of Fish Biology. 66: 45-72. 2005.

Brasil. Portaria Ministério da Saúde nº 518 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para o consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 26 de março de 2004.

Carneiro, D. B., Barboza, M. S. L., Menezes, M. P. Plantas Nativas na Vila dos Pescadores da Reserva Extrativista Marinha Caeté-Taperaçú Pará, Brasil. Acta bot. Brás. 24 (4): 1027 – 1033. 2010.

Cohen, M. C. L., Lara, R. J., Ramos, J. F. F., Dittmar, T. Factors influencing the viability of Mg, Ca and K in Waters of mangrove creek in Bragança, North Brazil. Mangr. Salt Marsh, 3: 9–15, 1999.

Cruz, A.; Silva Júnior, G. C. Spatial and temporal hydrochemical behavior of Piratininga coastal aquifer, Niterói City, Brazil. In: SALT WATER INTRUSION MEETING, 19, Cagliari, Italy, 2006. Proceedings of the 19th SWIM, v. 1, p. 12-18. 2006.

Davis J.L., Annan A.P. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, Vol.37: 531-551. 1989.

Dias, E. R. F., Medeiros, A. R. C., Gouvêa, J. L., Nunes, Z. M. P. Aplicação do método eletromagnético na determinação da interface água doce, água salgada na Vila do Bonifácio, Bragança – PA. Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro. 2007.

GOCAD, Gocad 2.5.2. user's guide.: GOCAD consortium (France). 2008.

Glaser, M. Interrelations between mangrove ecosystem, local economy and social sustainability in Caeté Estuary, North Brazil. *Wetlands Ecology and Management*, 11, p. 265–272. 2003.

Krause, G., Glaser, M., Soares, C., Torres, D., Blandtt, L., Cunha, F. D. Coastal Dynamics and Socio-Economic Implications. In: *Proceedings of the German-Brazilian Workshop on Neotropical Ecosystems*. 997-1000 p, 2000.

Krause, G.; Glaser, M. Co-evolução geomorfológica e dinâmica socioeconômica em uma vila de pescadores da Região Costeira Bragantina. (Pará, Norte do Brasil). *Ocean & Coastal Management*. 46, p. 859-874. 2003.

Knight, R. Ground penetrating radar for environmental applications. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 29: 22-255, 2001.

Luiz, J.G. O método do Georadar. Belém. Universidade Federal do Pará. Depto. de Geofísica, (Atualizado em Julho de 2012), 2008.

Mallet, J.L., Discreet smooth Interpolation in Geometric Modeling. *Computer – Aided Design*, 24, No. 4, pp. 177-191. 1992.

Martorano, L. G., Pereira, L. C., Cezar, E. G. M., Pereira, I. C. B. Estudo Climatológico do estado do Pará, classificação climática (Köppen) e deficiência hídrica. Thorntwhite, Mather. SUDAM/EMBRAPA. Belém. 53p. 1993.

Monteiro, M. C., Pereira, L. C. C., Guimarães, D. O., Costa, R. M. Ocupação Territorial e Variações Morfológicas em uma Praia de Macromaré do Litoral Amazônico, Ajuruteua-PA, Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada*. 9 (2): 91-99, 2009.

Paiva, A. L. R.. Modelagem Computacional e análise da salinização dos aquíferos na área central de Recife. 2004. 146 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

Pereira, L.C. C; Ribeiro, M. J. S; Guimarães, D. O; Souza-Filho, P. W.M.; COSTA, R. M. Formas de uso e ocupação na praia de Ajuruteua-Pará (Brasil). *Desenvolvimento e Meio Ambiente*. Nº 13, p. 125-136. 2006a.

Pereira, L. C. C; Souza-Filho, P. W. M; Ribeiro, M. J. S; Pinheiro, S. C. C; Nunes, Z. M. P; Costa, R. M. Dinâmica socioambiental na Vila dos Pescadores (Amazônia Oriental, Pará, Brasil). *Desenvolvimento e Meio Ambiente*. Nº 13, p. 125-136. 2006b.

Pinto, G. P. O método GPR aplicado à localização de tubulações utilizadas no abastecimento de água na região urbana do município de Belém – Pará. 2010. 96p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

Press, F.; Siever, R.; Grotzinger, J.; Jordan, T.H. Para entender a Terra. 4 ed. Rio Grande do Sul: Bookman, 2006.

Porsani, J. L. Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado- SP. 145f. UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campos de Rio Claro. Tese de Doutorado em Geofísica. 1999.

Raiol, A. Metodologias geofísicas e hidrogeoquímicas aplicadas à prospecção de água subterrânea em ambiente de intrusão salina na Vila de Algodão - PA. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2008.
REYNOLDS, J.M. An introduction to applied and environmental geophysics. Nova York: John Wiley & Sons, 806 p. 1997.

Rossetti, D. F. Goés, A. M. Souza, L. S. P. Estratigrafia da sucessão sedimentar Pós-Barreiras (Zona Bragantina – Pará) com base em radar de penetração do solo. 2002.

Santos, A. A. Shiraiwa, S. Silvino, A. N. O. Silva, W. T. P. Silva, N. A. Silveira, A. Migliorini, R. B. Comparação entre a investigação da água subterrânea e radar de penetração do solo (GPR) na área do aterro sanitário de Cuiabá (MT). Revista Brasileira de Geociências. 2009.

Silva, M. S. Morfoestratigrafia e evolução holocênica costeira de Salinópolis, Nordeste do Estado do Pará. 145f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. Belém. Pará. 1996.

Silva, B. T. A.; Gomes, C. C. Intrusão marinha em poços de exploração de água subterrânea, na beira-mar de fortaleza – Ceará. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo, 2007.

Souza-Filho, P. W. M. Influência das variações do Nível do Mar na Morfoestratigrafia da Planície Costeira Bragantina (NE do Pará) durante o Holoceno. 123f. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Pará. Pará. 1995.

Souza-Filho, P. W. M. & El-Robrini, M. Morfologia, Processos de Sedimentação e Litofáceis dos Ambientes Morfosedimentares da planície Costeira Bragantina, Nordeste do Pará (Brasil). Geonomos, 4 (2): 1-16, 1996.

Soares, M. J. S. Aplicação de Ferramentas Geofísicas no Diagnóstico Geoambiental. Expanded Abstracts. 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro. 19-22p. 2007.

Sousa Pinto, N. L. Águas Subterrâneas. In: Sousa Pinto, N. L.; Holtz. A. C. T.; Martins, J. G; Gomide, F. L. S. 1976. Hidrologia Básica. São Paulo. Ed. Blüncher, 1976.

TODD, D. K. Groundwater Hidrology. Vol. 2. 1980.