

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**POSSÍVEIS CAUSAS DE ATENUAÇÃO DO SINAL DO RADAR DE
PENETRAÇÃO NO SOLO - GPR NA REGIÃO NORTE DO BANHADO DO TAIM,
EXTREMO SUL DO BRASIL**

CAMILA TRINDADE LOPES

ORIENTADOR –Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza

Volume 1

Porto Alegre, 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**POSSÍVEIS CAUSAS DE ATENUAÇÃO DO SINAL DO RADAR DE
PENETRAÇÃO NO SOLO - GPR NA REGIÃO NORTE DO BANHADO DO TAIM,
EXTREMO SUL DO BRASIL**

CAMILA TRINDADE LOPES

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Everton Frigo – Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Felipe Caron – Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Jairo Savian – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito básico para obtenção do título de
Mestre em Geociências.

Porto Alegre, 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Lopes, Camila Trindade

Possíveis causas de atenuação do sinal do Radar de Penetração no solo - GPR na região norte do Banhado do Taim extremo sul do Brasil / Camila Trindade Lopes. -- 2018.

74 f.

Orientador: Eduardo Guimarães Barboza.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Processamento de GPR. 2. Camada guia de onda. 3. Planície Costeira. I. Barboza, Eduardo Guimarães, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que esteve comigo nessa jornada não me deixando faltar saúde e persistência nesses dois anos de desafios.

Agradeço ao meu orientador Eduardo Guimarães Barboza pela oportunidade e por acreditar no meu trabalho.

Em especial aos meus pais Cláudia e Paulo Roberto que sempre estiveram ao meu lado me dando todo apoio, incentivo e suporte.

A minha colega Geofísica Carolina Gonçalves Leandro que sempre me deu todo apoio e esteve presente em cada nova etapa dessa trajetória se mostrando uma verdadeira amiga.

Ao professor e amigo Vinícius Abreu de Oliveira que contribuiu incansavelmente e me ajudou toda vez que o recorri.

Aos amigos e colegas geofísicos Alane Neves e Israeli Rodrigues Mathias dos Santos que se propuseram a contribuir para o trabalho desde o início.

Aos meus familiares em especial a Ingrid e Italo pelo incentivo; ao Matheus pelo suporte técnico toda vez que precisei.

A todos os professores da instituição que participaram da minha formação, em especial ao professor Jairo Savian, por me aceitar no estágio a docência e confiar no meu trabalho.

Meu agradecimento ao CECO por toda estrutura e oportunidades concebidas; a CAPES pela bolsa de estudos.

Por último e não menos importante agradeço a toda equipe da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, técnicos, terceirizados que sempre me receberam muito bem e que de alguma forma contribuíram para conclusão dessa dissertação.

RESUMO

O método Geofísico de Radar de Penetração no Solo - GPR vem contribuindo muito em estudos de zonas costeiras, sobretudo por apresentar uma resposta e uma interpretação geofísico-geológica satisfatória na grande maioria dos casos. No entanto o GPR possui algumas limitações, por utilizar de princípios físicos para sua execução algumas propriedades existentes nos materiais em subsuperfície podem causar a atenuação do sinal ou mesmo manter a onda eletromagnética confinada se igualando a uma camada guia de onda. O objetivo desse estudo é entender e inferir a partir de uma análise física e de uma interpretação geofísica-geológica quais os fatores que podem estar causando esse tipo de fenômeno. A área de estudo está localizada no Banhado do Taim uma região do extremo Sul do Brasil, no estado do Rio Grande do Sul. O dado utilizado neste estudo consta de um perfil de GPR obtido sobre um paleocanal que conectava a região da atual lagoa Mirim com o oceano Atlântico. Esse registro apresenta dados excelentes de preenchimento de canais, porém na parte final do perfil esse registro é sombreado como se fosse adicionado um escudo bloqueador. Os resultados indicaram que esse bloqueio está relacionado à existência da camada guia de onda, que a mesma está associada a um tipo de ambiente lagunar. Esse ambiente está relacionado à presença de sedimentos finos, nos quais a fração de argila existente e a matéria orgânica misturada a um teor elevado de umidade contribuem para um alto valor de condutividade e baixa resistividade, resultando numa forte atenuação do sinal e aprisionamento da onda eletromagnética.

Palavras-Chave: Processamento de GPR; Camada Guia de Onda; Planície Costeira.

ABSTRACT

The Ground Penetrating Radar (GPR) method has contributed to studies of coastal zones, especially because it presents a response and interpretation geophysical-geological satisfactory. However, GPR has some limitations, because it uses physical principles in its execution, and some properties in subsurface materials can cause signal attenuation or even keep the electromagnetic wave confined to a waveguide layer. The objective of this study is to understand and infer from a physical analysis and a geophysical-geological interpretation the factors that cause this phenomenon. The study area is located in Banhado do Taim (marshes), a region in southernmost Brazil, state of Rio Grande do Sul. The data used in this study consists of a GPR profile obtained on paleochannels that connected the region of the current Mirim lagoon with the Atlantic Ocean. This record shows excellent channel fill data, however, in the final part of the profile, this record is shaded as if a shield were blocking the signal. Results indicate that this blockade is related to the existence of the waveguide layer, which is associated with a type of lagoon environment. This environment is related to the presence of fine sediments, in which the clay fraction and organic matter mixed with high humidity content, which contributed to the high conductivity and low resistivity value. Result is strong signal attenuation and entrapment of the electromagnetic wave

Keywords: GPR Processing; Waveguide layer; Coastal Plain.

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
1.1. Introdução.....	8
1.2. Localização e aspectos gerais da área de estudo	10
1.3. Contexto Geológico.....	13
1.3.1. Sistemas deposicionais na área de estudo.....	14
1.3. Método de GPR.....	15
1.4.1. Transmissão e reflexão do sinal de GPR	17
1.4.2. Física da Onda EM do GPR na área de estudo	20
1.4.3. Técnicas de aquisição	26
1.4.4. Perda da Energia do Sinal de GPR.....	29
1.4.5. Aquisição dos dados na área de estudo.....	31
1.4.6. Processamento	32
1.4.6.1. Etapas de processamento.....	32
1.4. Referências	36
2. CORPO PRINCIPAL – ARTIGO SUBMETIDO	42
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73

Estrutura da Dissertação

A Dissertação de Mestrado está estruturada em três capítulos principais e uma seção em anexo.

Capítulo 1 - Nas considerações iniciais constam: *Introdução, Localização e aspectos gerais da área de estudo, Contexto Geológico, Metodologia e Referências*. Na *Introdução* uma breve contextualização sobre o tema e descrição do objeto da pesquisa do Mestrado é apresentada, encontram-se sumarizados os objetivos e a importância do estudo proposto. No *Contexto Geológico* é realizada uma compilação dos mais recentes e completos trabalhos realizados na região descrevendo as principais características da Geologia da Bacia de Pelotas e da Província Costeira do Rio Grande do Sul. Na *Metodologia* encontra-se uma revisão bibliográfica do método teórico e físico, desde sua parte mais básica de conhecimento do equipamento, seguida da aquisição, processamento até a física que embasa o método do GPR. Nas *Referências* encontram-se os trabalhos citados no texto do primeiro capítulo.

Capítulo 2 - Compõe o Corpo Principal da Dissertação, com a versão integral do manuscrito submetido à revista Brazilian Journal of Geology, intitulado: GROUND PENETRATING RADAR -GPR SIGNAL ATTENUATION IN SANDS OF TAIM MARSHES, SOUTHERNMOST BRAZIL.

Capítulo 3 - Contém as *Considerações Finais* a partir das hipóteses descritas baseadas em fatores como geologia do contexto da área de estudo, características do meio e física do método do GPR.

Ao final, após o Capítulo 3 o anexo que compreende a carta de submissão do artigo da dissertação.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. Introdução

O Radar de Penetração no Solo - GPR, é um método de investigação Geofísica, indireto e/ou não destrutivo que obtém como resposta uma imagem com alta resolução da subsuperfície da Terra (estruturas geológicas ou objetos implantados pelo homem), utilizando para isso, ondas eletromagnéticas (EM). Esse método Geofísico amplamente aplicado a estudos rasos (Annan *et al.*, 1991) consiste basicamente em uma antena transmissora de pulsos eletromagnéticos de alta frequência entre 10 e 10000 MHz (Annan e Davis, 1997), que se propagam no subsolo interagindo com o meio de tal maneira que reflexões e difrações são geradas à medida que as propriedades elétricas e dielétricas das rochas em subsuperfície variam, sendo captadas por uma antena receptora.

O método de GPR tem sido muito utilizado em estudos geológicos permitindo a interpretação estratigráfica de uma série de sistemas deposicionais costeiros ao redor do mundo (Bridge *et al.*, 1995; Bristow e Jol, 2003; Bristow *et al.*, 2006; Fitzgerald *et al.*, 2007; Buynevich *et al.*, 2011; Scarelli *et al.*, 2017) e vem sendo constantemente aplicado a estudos de evolução costeira e análise estratigráfica de barreiras holocênicas do litoral sul do Brasil (BARBOZA *et al.*, 2009, 2011ab, 2013, 2014a; BIANCINI Da SILVA *et al.*, 2014; DILLENBURG *et al.*, 2014, 2017; LEAL *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2016; ROCKETT *et al.*, 2016; ROSA *et al.*, 2016, 2017).

Como qualquer outro método Geofísico, o GPR, apresenta algumas limitações, e entender o motivo da atenuação do sinal desses dados é o objeto de pesquisa dessa Dissertação, correlacionando assim, a física do método com as propriedades físicas das litologias existentes na área de estudo.

Por ser um método de um alcance de pouca profundidade, o GPR possibilita o reconhecimento de depósitos mais recentes, ou seja, em uma escala de tempo geológica enquadra-se no Quaternário, período esse que representa a última grande divisão da escala geológica, subdividido em duas Épocas: Pleistoceno e Holoceno (GUERRA e GUERRA, 2009). Neste período que se desenvolveu grande parte das feições geomorfológicas e fácies deposicionais de diversos ambientes de sedimentação que representam hoje as modernas planícies costeiras.

As planícies costeiras são definidas como regiões de baixo gradiente que margeiam corpos de água de grandes dimensões, como o mar, representando comumente faixas de terra recentemente emersas, compostas por sedimentos, em geral de idade quaternária (SUGUIO, 1992). Essas planícies incluem uma série de fácies deposicionais e feições geomorfológicas correlativas, formadas por sedimentos acumulados, principalmente, em ambientes fluviais, lagunar, paludial, eólico e marinho.

As barreiras costeiras são parte integrante da formação e da evolução das planícies costeiras do sul do Brasil. São formadas e evoluem pela ação e processos associados às variações do nível do mar, energia de ondas, declividade da plataforma, amplitude das marés, balanço de sedimentos, geometria da costa e da geologia antecedente (CURRAY, 1964; DAVIS e HAYES, 1984; LESSA *et al.*, 2000; e DILLENBURG e HESP, 2009). A barreira holocênica representa a região mais dinâmica da planície costeira. Apesar da pequena representação geográfica é um sistema que sofre pressões antrópicas por constituir-se em um ambiente de interesses múltiplos e de sobreposição de atividades. É na barreira holocênica que importantes ecossistemas costeiros estão presentes, como dunas, restingas, banhados, manguezais e praias.

O dado adquirido nesse trabalho possui uma excelente qualidade, no entanto, em um determinado local é possível perceber claramente a perda do sinal como se o mesmo estivesse sendo bloqueado por um escudo. Esse tipo de fenômeno pode acontecer por fatores que aprisionam o sinal fazendo com que a onda eletromagnética (EM) não retorne até a superfície, ou seja, ela não é captada pela antena receptora do GPR, também conhecido geofisicamente como uma camada guia de onda.

Seções de GPR adquiridas sobre lâmina d'água normalmente apresentam esse tipo de característica que ocorre pela presença da camada de água que funciona como um guia de ondas, aprisionando a energia eletromagnética entre interfaces com grandes contrastes de condutividade elétrica e de permissividade dielétrica (ar-água, água-sedimentos). A reverberação das ondas EM entre topo e base da camada de água é muito proeminente por causa desses contrastes. A presença deste tipo de evento na seção de GPR pode dificultar, ou até impossibilitar a identificação das reflexões primárias que possam estar relacionadas com as feições geológicas.

Existem ainda outros fatores que podem causar o aprisionamento do sinal da onda EM, é nesse contexto que a presente Dissertação vem desenvolver algumas hipóteses a partir de parâmetros que podem estar resultando nessa camada guia de onda ou mesmo perda do sinal dos dados adquiridos.

1.2. Localização e aspectos gerais da área de estudo

Essa dissertação utiliza um dado adquirido em uma campanha geofísica pelo método de GPR numa região denominada Banhado do Taim, localizada no extremo sul do Brasil (Figura 1).

A região do Banhado do Taim ou Estação ecológica do Taim, como também é conhecida, ocupa uma área de aproximadamente 34.000 hectares (70% no município de Santa Vitória do Palmar e 30% no município de Rio Grande, ambos situadas na região Sul do estado do Rio Grande do Sul) (IBAMA, 2003). Existe nesse local a preservação de um grande viveiro natural de animais e vegetais distribuídos em banhados, campos, lagoas, praias arenosas e dunas litorâneas.

Na região são encontradas flora e fauna nativas abundantes representando uma peculiar feição portadora de significativa e singular biodiversidade, que foi contemplada em 1977 no Programa de Estações Ecológicas do Governo Federal, através da SEMA - Secretaria Especial de Meio Ambiente, Ministério do Interior.

O Banhado do Taim é um importante berçário das aves migratórias. Além das aves, este ambiente favorável abriga a maior variação de mamíferos do Brasil. Sabe-se por meio de investigações realizadas na década de sessenta (Sena Sobrinho 1961, 1963), envolvendo a caracterização de conchas calcárias e análise de água das lagoas, dos banhados e canais, que o terreno do Taim é de origem marinha recente até uma profundidade de 4 m aproximadamente, e que o nível atual dos banhados estaria 2,5 m acima do atual nível do mar.

Dillenburg *et al.* (2000) estimam que o nível relativo do mar tenha alcançado no Holoceno entre 2 e 4 m acima do nível atual, corroborando com as propostas de Angulo & Lessa (1997) e Angulo *et al.* (2006) para a região norte da Bacia de Pelotas e de Barboza e Tomazelli (2003) para a região do litoral médio na Lagoa dos Patos.

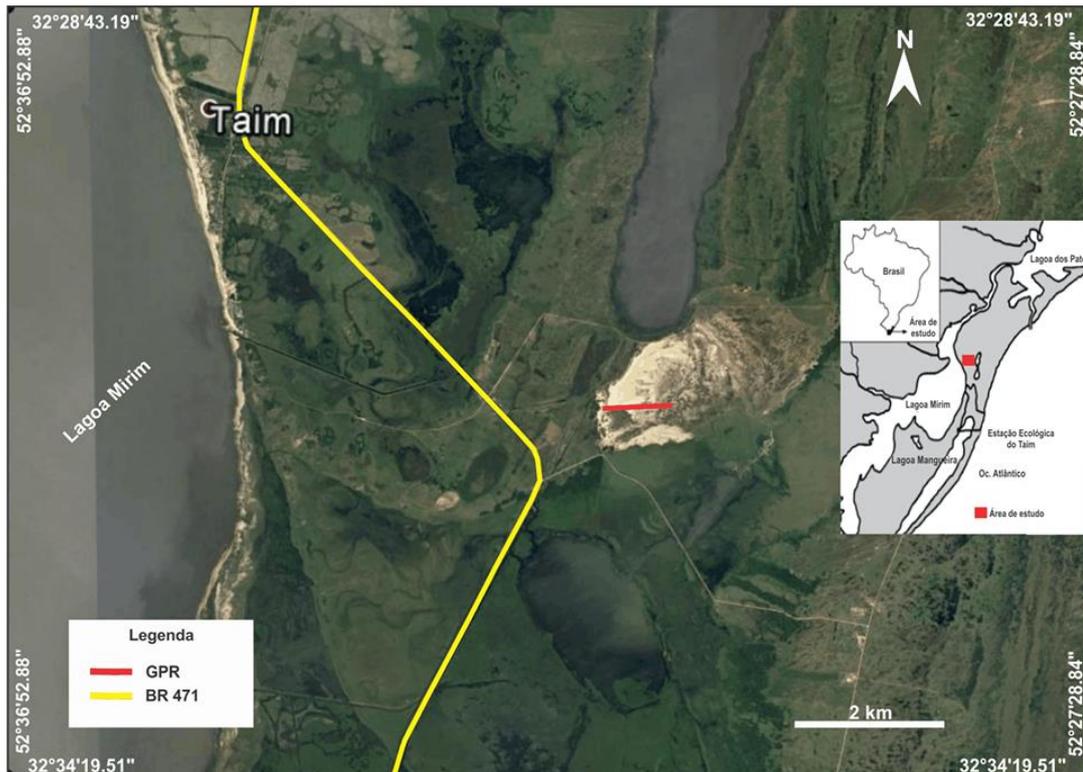


Figura 1 – Localização do perfil de GPR na área de estudo. Fonte: Imagem de satélite Google™ Earth.

Um estudo edafológico realizado no Banhado do Taim (Ministério do Interior, 1969), revela que a salinidade, baseada em medidas de condutividade elétrica, da água da Lagoa da Mangueira é similar à água superficial do Banhado do Taim, conforme dados de 1951 e 1968. De acordo com os dados de 1968, as amostras de água superficial do Banhado do Taim são caracterizadas como não salinas ou levemente salinas. Menciona-se, ainda que a partir de 2 m de profundidade as águas seriam salinas, devido ao fundo marinho arenoso, sotoposto a uma camada argilosa, que funcionaria como uma barreira impermeável em relação à água doce superficial. Cogita-se inclusive da existência de sulfatos que teriam originado acumulações de sulfetos em banhados.

Investigações da ecodinâmica da região do Banhado do Taim (Gomes *et al.*, 1987) num contexto mais amplo, oferecem subsídios geológicos, que contribuíram de modo diferenciado em relação a abordagens anteriores. Aspectos geológicos a presença de corpos lagunares, inclusive a Lagoa Mangueira e a colmatação parcial da própria lagoa, resultando no próprio Banhado do Taim, sugerem uma pretérita ligação entre a Lagoa Mirim e o Oceano Atlântico durante o Holoceno (HORN FILHO *et al.*, 1988).

Ayup-Zouain *et al.* (2003) identificaram a existência de um paleocanal que pode ser uma evidência de uma evolução ao longo de três fases de estabilização do nível do mar. Em todos os eventos observados, é possível constatar que a deriva litorânea dominante, prevalecia no sentido SSW-NNE. Os primeiros trabalhos que referiam sobre evidências de um ou mais canais que faziam a ligação direta entre a Laguna Mirim e o Oceano Atlântico, foram realizados por GODOLPHIM (1985) e HORN FILHO *et al.* (1988). Os autores referenciavam a presença de canais durante o Holoceno, os quais intercomunicavam o sistema lagunar com o Oceano Atlântico, tanto no setor norte da Lagoa Mirim, nas proximidades do Canal do Rio Grande, como nas adjacências do Banhado Taim. A interpretação e comparação espaço-temporal das variações morfológicas observadas no entorno do sistema moderno Lagoa Mirim – Banhado do Taim, permitem estabelecer claramente considerações sobre a presença de três fases evolutivas do paleocanal, que outrora comunicava o antigo sistema lagunar com o Oceano Atlântico (AYUP-ZOUAIN *et al.*, 2003).

O modelo evolutivo apresentado por Tomazelli *et al.* (2008) e discutido por Rosa (2012) demonstra que a região no último máximo glacial se comportou como um vale inciso, com a presença de vales fluviais ao longo do eixo costeiro de 15 km de extensão, hoje delimitado pelas elevações dos sistemas de barreiras pleistocênicas. Durante o último máximo relativo do nível do mar, essa região formou um grande estuário onde aos poucos durante a queda do nível relativo do mar nos últimos 4 ka o mesmo foi modificado. Essa modificação ocorreu devido a progradação de cordões litorâneos regressivos que formam, atualmente, uma planície regressiva que se estende até o canal de Rio Grande (DILLENBURG *et al.*, 2017).

O Sistema Hidrológico do Taim (SHT) é composto essencialmente de quatro unidades ecodinâmicas: a Planície Marinho-Eólica o alinhamento dos banhados Pós Planícies Marinho-Eólica, o Platô de Santa Vitória do Palmar/Formação Chuí e o Mosaico do Sudeste da Lagoa Mirim (GOMES *et al.*, 1987).

O clima atual da região, de acordo com a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2014), é subtropical constantemente úmido (Cfa), sem estação seca, com verão quente. A precipitação média anual fica entre 1300 e 1600 mm, com valores máximos encontrados nos meses de verão e os mínimos no inverno. A temperatura média anual entre 16 e 18°C.

1.3. Contexto Geológico

A região do Taim, localiza-se na parte emersa da Bacia de Pelotas que está situada no extremo Sul do país entre os paralelos 28°S e 35°S e entre os meridianos 46°W e 53°W (Figura 2). Segundo Dias *et al.* (1994) a Bacia de Pelotas ocupa duas porções bem definidas: uma área emersa que tem cerca de 40.000 km² e constitui a Província Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), e uma área submersa de aproximadamente 210.000 km² até a isóbata de 2.000 m (Elevação Continental/Planície Abissal).

A Bacia de Pelotas é limitada ao norte pela Plataforma ou Alto de Florianópolis, ao leste pela Planície Abissal Atlântica, ao oeste pelo Escudo Cristalino Uruguaio-Sul-Rio-Grandense e pelas rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná e ao Sul pelo alto estrutural de Cabo Polônio no Uruguai.

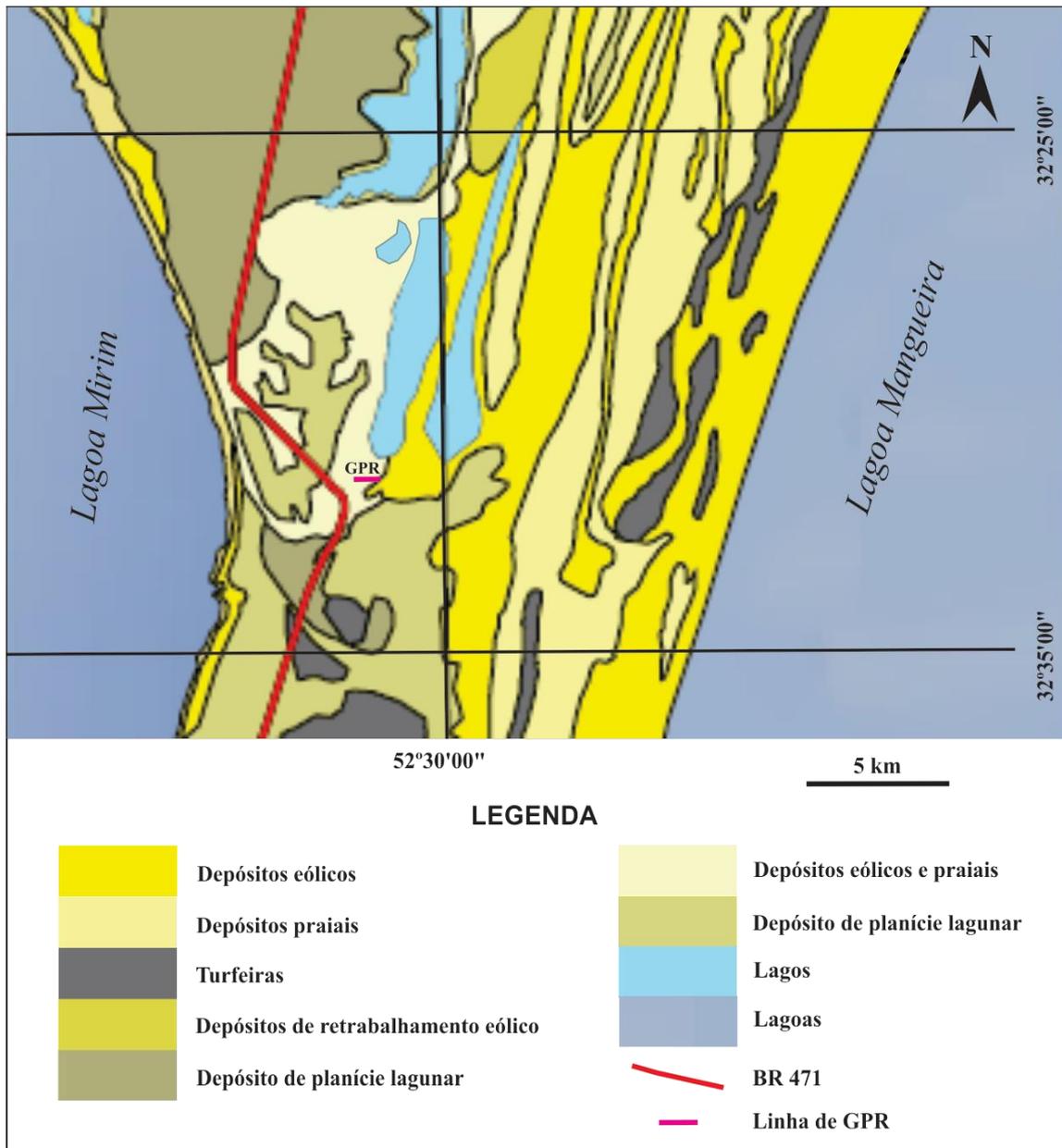


Figura 2 – Mapa geológico de detalhe da área de estudo Fonte: Modificado de CPRM 2008.

1.3.1. Sistemas deposicionais na área de estudo

Os sistemas deposicionais encontrados na área de estudo corresponde aos sistemas do tipo laguna-barreira II, III e IV, propostos por Villwock *et al.* (1986). Cada um desses sistemas laguna-barreira corresponde a uma sequência deposicional de alta frequência (ROSA *et al.*, 2011; 2017). Conforme Dillenburg e Barboza (2014) essa região do Banhado do Taim encontra-se na interface entre uma projeção costeira ao sul e o início do embaiamento da região de Rio Grande, chamado de setor Albardão-Estreito com 205 km de extensão.

O local onde foi adquirido o perfil de GPR localiza-se na porção norte da segmentação das barreiras pleistocênicas II e III, representada pela instalação de vales incisivos durante o rebaixamento do nível do mar (Rosa *et al.*, 2009), sobre depósitos eólicos pertencentes ao sistema Barreira IV.

1.3. Método de GPR

Historicamente, as teorias básicas de funcionamento do GPR tiveram início quando o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell constatou a existência das ondas EM e aferiu que a eletricidade, o magnetismo e a luz faziam parte de um mesmo fenômeno físico, elaborando o que hoje em dia são conhecidas como as equações de Maxwell. Baseado nessa ideia, Heinrich Hertz, um consagrado físico alemão, provou em 1887 com seu experimento sobre ondas EM que essas ondas poderiam ser transmitidas por diferentes tipos de materiais e refletidas por materiais condutores e dielétricos. Dessa forma, em 1904 o inventor alemão Christian Hülsmeier desenvolveu o que muitos dizem ser o primeiro radar utilizando a reverberação de ondas EM para evitar a colisão entre navios (DANIELS, 2004).

Apenas em 1910 que sinais eletromagnéticos foram aplicados com o objetivo de localizar objetos enterrados. Isso ocorreu quando Leimbach e Löwy enterraram antenas dipolares e compararam a magnitude do sinal recebido utilizando pares de antena transmissora e receptora (DANIELS, 2004). Com essa técnica foi possível gerar uma imagem que identificava os objetos. Em 1926, Hülsenbeck usou pulsos eletromagnéticos para estudar objetos enterrados e descobriu que qualquer variação dielétrica no meio de propagação produziria reflexões (Daniels, 2004).

Como qualquer outro método geofísico o GPR é interpretado de acordo com a propriedade física que ele está medindo. A propagação do sinal e a profundidade de alcance das ondas EM dependem de fatores como frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas do meio (Davis e Annan, 1989), condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética que serão descritas no tópico 3.1. respectivamente. Por ser um equipamento que usa alta frequência, o GPR é geralmente aplicado em estudos rasos, podendo atingir até 50 m de profundidade em areias secas, utilizando antenas com frequências não tão altas (SMITH e JOL, 1995).

As variações das propriedades elétricas fazem com que parte do sinal emitido seja refletida e parte refratada; as ondas refletidas são recebidas/captadas por outra antena também colocada na superfície denominada de antena receptora (Figura 3).

As antenas em um sistema de radar são consideradas transdutores que convertem energia elétrica em energia eletromagnética, e vice-versa, quando ocorre uma variação na aceleração da corrente elétrica na antena (DANIELS, 2000). Elas podem operar em modo monoestático, em que existe apenas uma antena para transmitir e receber o sinal; ou em modo biestático, em que existem duas antenas, uma para cada função.

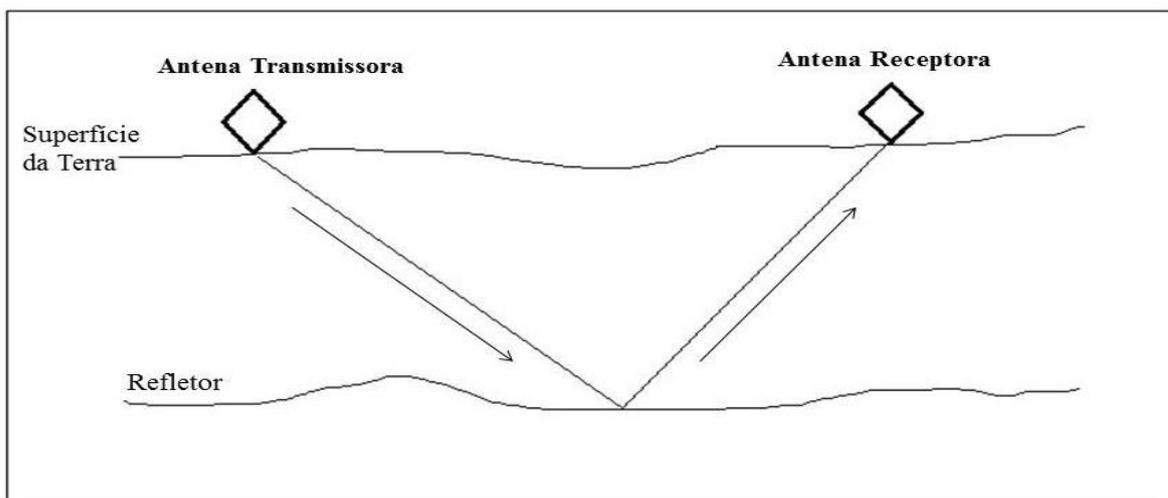


Figura 3 - Simulação do funcionamento do método de GPR em uma superfície. Percurso de uma onda EM saindo da antena transmissora até chegar a antena receptora. Fonte: Autor

A energia refletida devido às variações das propriedades elétricas do meio é registrada em função do tempo de percurso (tempo duplo) pela antena receptora, que por sua vez amplifica o sinal, digitaliza e o armazena em uma fita magnética digital (DAVIS e ANNAN, 1989). Os principais elementos que constituem um sistema de GPR são (Figura 4):

- Duas antenas, uma emissora e outra receptora
- Fonte de energia
- Sistema de armazenamento digital
- Computador de monitorização em tempo real
- Carrinho de transporte (opcional)

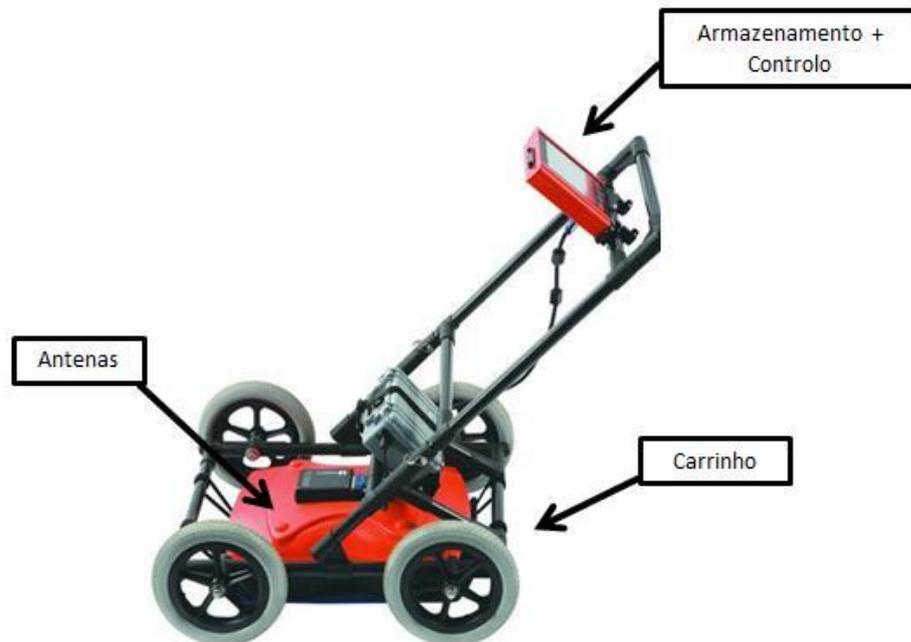


Figura 4 - Imagem de um equipamento de GPR. Fonte: Universidade de Aveiro

1.4.1. Transmissão e reflexão do sinal de GPR

O sistema de GPR é especificado pela frequência central das antenas e, normalmente, estas são projetadas para atuar numa faixa situada 0,5 vezes a frequência central (frequência mínima) e até 1,5 vezes a frequência central (frequência máxima) (DANIELS, 2000). A frequência utilizada em campo deve ser ajustada nesses intervalos para uma melhor adaptação ao objetivo do trabalho que se pretende desenvolver.

As ondas EM, no GPR, são geradas em consequência de um campo elétrico variável que produz um campo magnético. Toda vez que uma corrente elétrica de um condutor se altera no tempo, tal condutor irá irradiar energia eletromagnética. O mecanismo fundamental que permite que esse fenómeno aconteça é a aceleração de partículas eletricamente carregadas.

Ao aplicar uma voltagem alternada nos condutores de uma antena, as cargas livres são forçadas a oscilar. Como resultado, as partículas são aceleradas e um feixe de ondas EM é produzido. Dessa forma, a antena transmissora gera um trem de onda que se propaga em duas direções: uma parte se propaga pelo ar, e a outra, pelo meio de interesse em um feixe cônico a uma velocidade determinada

principalmente pelas propriedades dielétricas do meio. O sinal emitido se propaga até encontrar uma interface com diferentes propriedades eletromagnéticas, onde é refletido e, posteriormente, captado pela antena receptora.

A superfície pela qual a onda se espalha pelo meio é chamada de frente de onda, enquanto que a linha reta entre a antena transmissora e a frente de onda é chamada de raio da onda. Os raios mostram o trajeto percorrido pela frente de onda desde a sua transmissão (DANIELS, 2000). Caso esse feixe encontre um objeto enterrado ou uma estrutura geológica em seu caminho parte do sinal será refletido, enquanto que a outra parte continuará a se propagar. O sinal refletido será gravado em função do tempo de trânsito de ida e volta, chamado tempo duplo de percurso da onda, e do intervalo de amostragem espacial. O pulso gravado em cada estação é denominado de traço e a sua "assinatura" traz informações sobre o comportamento dielétrico do meio em que o sinal se propagou (DANIELS, 2000). Todos os traços gravados formam uma espécie de imagem de subsuperfície chamada de radargrama. Os radargramas ou perfis de GPR são obtidos movendo-se as antenas transmissora e receptora com um intervalo de espaçamento constante.

A resposta do GPR em cada ponto do terreno amostrado é representada por um traço. Os traços refletem a resposta da propagação da onda eletromagnética no subsolo. Quanto maior a amplitude do sinal registrado maior será o contraste elétrico entre os meios investigados. O resultado de um perfil de GPR então será uma imagem das variações em subsuperfície das propriedades elétricas em função do tempo duplo de percurso do pulso eletromagnético.

A frequência da antena tem um papel muito importante uma vez que é ela a principal responsável pela profundidade de penetração da onda EM. Maiores frequências de onda maior resolução e menor alcance de profundidade de penetração. Por outro lado, menores frequências de onda menor resolução e maior profundidade de penetração. A Tabela 1 lista os valores das profundidades alcançadas de acordo com as frequências utilizadas.

Tabela 1 - Profundidade máxima de penetração versus frequência central das antenas (PORSANI, 1999).

Profundidade máxima de penetração (m)	Frequência Central (MHz)
1	1000
2	400
4	200
25	100
30	50
40	25
50	10

A resolução vertical corresponde à capacidade de distinguir as reflexões provenientes do tempo e da base de camadas de pequena espessura. Na Tabela 2 estão alguns valores estimados de resolução vertical para diferentes frequências.

Tabela 2 - Frequência central das antenas versus resolução vertical (ANNAN, 1992)

Frequência Central (MHz)	Resolução vertical (m)
200	0,25
100	0,50
50	1,00
25	2,00

A velocidade e a atenuação são fatores que descrevem a propagação das ondas EM na subsuperfície. Tais fatores dependem das propriedades dielétricas e condutoras dos materiais que constituem o meio em questão, assim como da permeabilidade magnética.

1.4.2. Física da Onda EM do GPR na área de estudo

O GPR se baseia nas equações de Maxwell que descrevem matematicamente a física de geração e propagação de campos e ondas eletromagnéticas. As equações de Maxwell são uma reformulação de quatro leis, são elas a: Lei de Faraday, Lei de Ampère, a Lei de Gauss para o campo elétrico e o magnetismo, indicadas nas equações 1.0 a 1.3, respectivamente.

- Lei de Faraday

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.0)$$

- Lei de Ampere

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.1)$$

- Lei de Gauss

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1.2)$$

A lei de Gauss para o magnetismo demonstra que, em uma superfície fechada, o fluxo magnético será igual a zero, ou seja, o fluxo dirigido para dentro do pólo sul será igual ao fluxo emitido ao pólo norte.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.3)$$

Em todos os casos:

\vec{E} é o vetor campo elétrico;

\vec{B} é o vetor indução magnético;

\vec{H} é o vetor campo magnético;

q é a densidade volumétrica da carga;

\vec{J} é o vetor densidade da corrente de condução;

\vec{D} é o vetor de deslocamento elétrico;

Essas equações não possuem a capacidade de fornecer as características físicas do meio, por isso se faz necessário associá-las às relações constitutivas para que suas propriedades físicas traduzam a interação entre os campos

eletromagnéticos de uma fonte com um meio através de propriedades físicas dos materiais.

As propriedades eletromagnéticas (EM) dependem de sua composição e umidade, ambos controlando a velocidade de propagação das ondas EM e sua atenuação (ANNAN, 1992). Os materiais geológicos (rochas sedimentares, ígneas e metamórficas) são geralmente considerados semi-condutores ou dielétricos, podendo ser caracterizados por três propriedades físicas: condutividade elétrica σ , permissividade dielétrica ϵ e permeabilidade magnética μ .

Em termos físicos, essas relações representam a quantificação macroscópica do comportamento médio de elétrons, moléculas e íons, quando submetidos a campos eletromagnéticos externos (ANNAN, 1992).

Cada uma destas propriedades pode ser interpretada separadamente e reproduzem alguma característica de interesse do material estudado, representando o seu comportamento no meio e como interage com a onda EM.

- *Condutividade elétrica*

A primeira relação constitutiva, conhecida como a Lei de Ohm na formulação microscópica, tem a função de relacionar o vetor densidade de corrente de condução \vec{j} ao vetor campo elétrico \vec{E} , através de um fator de proporcionalidade, chamado de condutividade elétrica (σ), que tem sua unidade em Siemens/metro (S/m). Este fator expressa a habilidade de um corpo em conduzir corrente elétrica (KELLER, 1987). O aumento de condutividade está intrinsecamente ligado à atenuação do sinal eletromagnético. A lei de Ohm é expressa pela equação:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (1.4)$$

Nos materiais geológicos simples, essa relação é aproximadamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica σ . Segundo Keller (1987), a condutividade σ , ou o seu inverso, a resistividade ρ , pode variar até 20 ordens de magnitude para os materiais geológicos próximos a superfície. Os fatores que impactam diretamente nesta variação são: o teor de umidade, a porosidade, a salinidade, a proporção da fração argila e a presença de minerais condutivos.

- *Permissividade dielétrica*

A segunda relação constitutiva do meio tem a função de relacionar o vetor deslocamento elétrico \vec{D} ao vetor campo elétrico \vec{E} através da constante de proporcionalidade que é a permissividade dielétrica do material ϵ (F/m). A ϵ expressa, em termos físicos, a quantidade de energia elétrica armazenada e/ou perdida, através da criação de um campo elétrico interno (entre íons e/ou moléculas), devido a deslocamentos induzidos, quando moléculas e/ou íons são submetidos a um campo elétrico externo variável (OLHOEFT, 1996; POWERS, 1997).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.5)$$

Devido à presença de água em todos os materiais geológicos, à medida que a frequência da onda eletromagnética aumenta, a permissividade dielétrica da água também aumenta, chegando ao limite entre aproximadamente 10 GHz a 20 GHz, onde o efeito de relaxação é máximo, fazendo com que a molécula de água dissipe a energia acumulada na forma de calor (POWERS, 1997).

De acordo com Annam (1997), tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade dielétrica são importantes, pois, afetam diretamente a atenuação e propagação das ondas de radar. Ward e Hohmann (1987) sugerem que a condutividade é dominante para ondas EM de baixas frequências (<1 MHz), enquanto que em altas frequências (>1 MHz) a permissividade dielétrica é dominante. A permissividade dielétrica relativa ϵ_r ou constante dielétrica dos materiais k é definida pela equação:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_r} \quad (1.6)$$

Ainda sobre a constante dielétrica k , quanto mais baixa for essa constante no meio, mais condutivo ele será e pior será o sinal do radar, ocorrendo à atenuação da onda eletromagnética, sendo esse meio de alta condutividade. Assim, cabe ressaltar que a constante dielétrica k está associada ao poder de penetração do sinal em subsuperfície que tem como ponto principal a permissividade e permeabilidade, a primeira ligada ao campo elétrico, e a segunda ao campo eletromagnético, a resultante desse produto vetorial corresponde à onda GPR.

- *Permeabilidade magnética*

A terceira relação constitutiva tem a função de relacionar o vetor de indução magnética \vec{B} e vetor de campo magnético \vec{H} , e a constante de proporcionalidade μ , chamada de permeabilidade magnética do material μ .

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.7)$$

A μ é um fator comumente apresentado aos operadores de GPR como uma medida relativa dada por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.8)$$

Sendo $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m.

Da mesma forma que a permissividade dielétrica, a permeabilidade magnética também é uma quantidade que expressa o acúmulo de energia, contudo, proveniente da indução magnética. Uma importante característica dessa propriedade é que ela praticamente não varia com a frequência, desse modo, a variação entre a permeabilidade magnética do meio e a do espaço livre não é significativa (OLHOEFT, 1981; KELLER, 1987).

Utilizando a manipulação algébrica entre as leis, de Faraday e a de Ampère chegamos à equação da onda (equação de Helmholtz); a combinação de ambas fornece as bases para descrever quantitativamente os sinais GPR (ANNAN, 1992). Considerando que o campo elétrico \vec{E} está na direção x, e que o campo magnético é sempre perpendicular a este, logo está na direção y, tem-se por consequência que a onda se propaga na direção z (relação conhecida como Regra da Mão esquerda).

Então pode-se expressar:

$$\vec{H} = (0, H_y, 0) \text{ e } \vec{E} = (E_x, 0, 0)$$

Substituindo as equações (1.4), (1.5) e (1.7) nas equações (1.0) e (1.1) temos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} \quad (1.9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} \quad (1.10)$$

Aplicando o operador rotacional na equação (1.10) e utilizando a identidade vetorial, equação (1.11):

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - (\nabla^2 \vec{E}) \quad (1.11)$$

Onde $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$, obtemos:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial(\vec{\nabla} \times \vec{H})}{\partial t} \quad (1.12)$$

Que corresponde a:

$$\nabla^2 \vec{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \left[\sigma \vec{E} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} \right] \quad (1.13)$$

Uma vez que os campos \vec{H} e \vec{E} variam harmonicamente sob a forma:

$$\vec{E} \propto \vec{E}_0 = e^{i\omega t} \quad (1.14)$$

$$\vec{H} \propto \vec{H}_0 = e^{i\omega t} \quad (1.15)$$

Tem-se que a derivada temporal da equação acima é:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = i\omega E_0 e^{i\omega t} \quad (1.16)$$

Assim a equação (1.13) torna-se a equação de Helmholtz:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_x}{\partial z^2} = [-i\omega\mu(\sigma + i\epsilon\omega)] \vec{E}_x \quad (1.17)$$

Onde, $\omega = 2\pi f$, corresponde a frequência angular, sendo que f é a frequência da antena transmissora.

Como já mencionado anteriormente sabe-se que a profundidade de penetração do sinal é inversamente proporcional à frequência da onda eletromagnética, ou seja, a profundidade de penetração do sinal será maior quanto menor for a frequência da onda EM. O Inverso também acontece, a profundidade de penetração do sinal será menor quanto maior for a frequência da onda EM. O teor de umidade dos solos e o tipo de solo irão influenciar o retroespalhamento do sinal de radar. Esses fatores afetam ainda o poder de penetração do sinal no solo, uma vez que quanto maior o valor tanto de frequência quanto de umidade do material de subsuperfície, menor a penetração e alcance do sinal, o que favorece uma maior refletividade e potencialmente um maior retroespalhamento (LEWIS e HANDERSON, 1998).

Ao termo que multiplica \vec{E}_x (eq. 1.17), chamamos de (k^2) , onde este é o número de onda, no qual, estão associadas todas as características elétricas e magnéticas de um determinado meio:

$$k^2 = [-i\omega\mu\sigma + \omega^2 \mu\epsilon] \quad (1.18)$$

A parcela $-i\omega\mu\sigma$, da equação (1.17), corresponde ao termo de atenuação da onda do radar, dominante nos métodos de baixas frequências, enquanto que a segunda parcela $\omega^2 \mu\epsilon$, corresponde ao termo de propagação dominante para as altas

frequências. Portanto, em altas frequências, pode-se considerar que a propagação da onda eletromagnética é dada principalmente pela corrente de deslocamento, ou seja:

$$k^2 \approx \omega^2 \mu \epsilon \quad (1.19)$$

e sendo assim é esperado um regime de propagação, dito, radiante (sem dispersão) ou meio dielétrico de baixa perda (STRATON, 1941), desde que a seguinte relação seja obedecida:

$$\omega^2 \mu \epsilon \gg |i\omega\mu\sigma| \quad (1.20)$$

Resolvendo-se a equação de Helmholtz (Equação 1.17) é obtida a seguinte solução analítica:

$$E_x(z, t) = E_0^+ e^{(-kx + \omega t)} + E_0^- e^{(-kx + \omega t)} \quad (1.21)$$

Onde E_x é a componente do campo elétrico na direção x , ou seja, paralela à direção do eixo da antena transmissora; E_0^+ é a porção do campo elétrico que se propaga na direção e sentido da subsuperfície, dada pelo eixo $+z$, apontando para o centro da Terra; E_0^- é a porção do campo elétrico que se propaga na mesma direção de E_0^+ , porém em sentido oposto à subsuperfície, dada pelo eixo $-z$; k é o número de onda, expresso na forma complexa abaixo, equação (1.22):

$$k = \alpha + i\beta \quad (1.22)$$

sendo que α , corresponde à constante de atenuação e β à constante de propagação, ambas dadas por:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (1.23)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad (1.24)$$

E o termo, $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$, corresponde à tangente de perdas, $\tan(\delta)$, onde δ é o ângulo da diferença de fase entre o campo elétrico e a densidade de corrente, o qual expressa as perdas de energia pelo transporte de cargas e relaxação da polarização, sendo obtidas, através da relação entre a corrente de condução, $\sigma\vec{E}$ e a corrente de deslocamento, $\omega\epsilon\vec{E}$ (OLHOEFT, 1996).

De acordo com (Daniels, 1989; Annan, 1992), pode-se considerar apenas a primeira parcela da equação (1.21), ou seja, o termo que corresponde à propagação da onda na subsuperfície. Assim, após a substituição do termo (1.22) na equação (1.21) é obtida a seguinte expressão:

$$E_x(z, t) = E_0^+ e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (1.25)$$

Segundo Annan, 1992 e Daniels (1996), para o regime radiante do GPR, devido a sua alta frequência de operação, os valores de " α " eq. (1.23), " β " eq. (1.24) podem ser expressos como:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.26)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (1.27)$$

e a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio é expressa como:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.28)$$

Outros parâmetros importantes que determinam a propagação de ondas EM, bem como a resolução e penetração do sinal são:

O comprimento da onda,

$$\lambda = \frac{V}{f} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.29)$$

e a profundidade de penetração do sinal, o qual traduz a capacidade de investigação do método, é expressa pela atenuação, sendo dada por:

$$\alpha = 1,636 \frac{\sigma_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.30)$$

A área na qual os dados foram adquiridos faz parte de um ambiente de zona costeira que é um excelente local para a aquisição de dados de GPR, pois ambientes arenosos possuem baixa condutividade elétrica, o que propicia uma boa penetração da onda EM e a identificação de estruturas em subsuperfície. A investigação de paleocanais, por exemplo, utilizando o GPR tem um grande potencial, pois, a sua grande condutividade elétrica devido à influência de matéria orgânica e também ao acúmulo de água em subsuperfície, causa atenuação no sinal da onda EM, sendo essa ausência ou perda de sinal uma resposta do método para esse tipo de ambiente.

1.4.3. Técnicas de aquisição

A aquisição de dados de GPR pode ser realizada de quatro maneiras distintas: (I) perfil de reflexão com afastamento constante (*common offset*), (II) reflexão e refração de grande abertura angular ou *Wide Angle Reflection and*

Refraction (WARR), (III) Ponto Médio Comum ou *Common Mid Point* (CMP) e (IV) transiluminação ou tomografia.

I) *Perfil de reflexão com afastamento constante (common offset)*

As antenas transmissora e receptora são mantidas a uma distância de separação fixa e são movidas na superfície. O resultado é um perfil de GPR onde no eixo vertical é mostrado o tempo duplo de viagem das ondas refletidas e no eixo horizontal são mostradas as posições das antenas no terreno. Como a separação entre as antenas é bastante pequena, normalmente as seções podem ser consideradas como zero - offset. As seções de radar que apresentem hipérbolas de difração permitem que se obtenha um modelo de velocidades baseado no número de hipérbolas, nos valores de velocidades oriundos do ajuste de tais hipérbolas e, finalmente, da interpolação deste valor.

II) *Reflexão e refração de grande abertura angular (WARR)*

Neste modo, uma das antenas permanece em uma localização fixa, enquanto a outra antena é afastada lateralmente. Para realizar este tipo de perfil devem existir refletores planos e horizontais ou com inclinação pequena. Este modo de aquisição é útil para estimar a variação da velocidade do sinal com a profundidade. Com um conjunto de famílias WARR pode-se obter famílias CMP e assim um campo de velocidades.

III) *Perfil de ponto médio comum (CMP)*

As antenas transmissora e receptora são afastadas simultaneamente em sentidos opostos na mesma direção do perfil, de forma que o ponto médio entre as antenas permaneça fixo. Este modo de aquisição é utilizado para estimar como a velocidade de propagação do sinal varia com a profundidade. A vantagem de realizar o CMP está em realizar uma análise de velocidade com maior precisão. Este procedimento requer a presença de refletores.

IV) *Transiluminação ou tomografia*

Esta técnica é utilizada em poços, minas subterrâneas, cavernas, construção civil, inspeção de colunas de concreto e outras aplicações. As antenas transmissora e receptora são posicionadas em lados opostos do meio a ser investigado. Normalmente, uma antena é fixada em um lado de um pilar ou um poço, enquanto outra antena é movida no outro lado do pilar ou em outro poço. Com a transiluminação pode-se determinar a velocidade do sinal no meio e, se for possível medir a amplitude do sinal, sendo viável a determinação da atenuação da onda eletromagnética.

- ***Frequência de Nyquist (fN)***

Independentemente do modo de aquisição empregado no levantamento, alguns critérios devem ser obedecidos para que o sinal seja registrado corretamente. O principal deles diz respeito ao intervalo de amostragem do sinal, que corresponde ao intervalo de tempo em que o sinal analógico é amostrado e digitalizado para que possa ser gravado no sistema. Este intervalo de amostragem (Δt) está relacionado à máxima frequência que se deseja registrar, denominada frequência de Nyquist (fN) e dada pela relação (KEAREY ET *al.*, 2009).

$$fN = \frac{1}{2\Delta t} \quad (1.31)$$

Qualquer componente com frequências abaixo da frequência de Nyquist serão amostradas corretamente, já as com frequências mais altas sofrerão um fenômeno chamado de falseamento (*aliasing*). Este fenômeno faz com que frequências altas sejam amostradas de forma errada e o sinal registrado não seja fiel ao sinal analógico recebido pela antena. Deve-se verificar o comprimento da janela temporal do dado, i.e., o tempo durante o qual o sinal refletido será registrado. Uma janela muito curta provavelmente não será suficiente para registrar uma reflexão profunda; porém uma janela muito grande pode gerar um registro muito grande. Em alguns sistemas comerciais o intervalo de amostragem está condicionado ao tamanho da janela temporal, onde o usuário estabelece o tamanho da janela temporal e o número de amostras que deve ser contido nesta janela. Dessa forma, uma janela temporal muito longa pode acarretar também em um intervalo de amostragem insuficiente.

1.4.4. Perda da Energia do Sinal de GPR

É comum que em um levantamento de dados de GPR ocorram perdas de energia e atenuação do sinal da onda EM emitida pela antena transmissora. A perda de energia gera um problema na aquisição dos dados, pois ela limita a profundidade de penetração da onda EM; ela pode ser causada por diversos fatores desde o momento em que o sinal é irradiado pela antena transmissora até o momento que ele é captado pela antena receptora. Dentre esses fatores pode-se citar acoplamento das antenas, perdas por divergência esférica, difração, dispersão, absorção e atenuação.

A perda de energia começa no próprio sistema devido à eficiência das antenas e ao acoplamento entre elas e o meio, o que pode gerar perdas de transmissão entre o ar e o solo. Quando o sinal irradiado encontra o solo, as ondas se propagam em um feixe cônico, compondo um ângulo de 90° com a superfície. Esse espalhamento geométrico faz com que existam perdas de energia na frente de onda referentes à divergência esférica, ocorrendo a diminuição da amplitude da *wavelet*. A redução da energia é inversamente proporcional à distância percorrida pela onda, em que o decréscimo por unidade de área corresponde a $1/r^2$ (Figura 5).

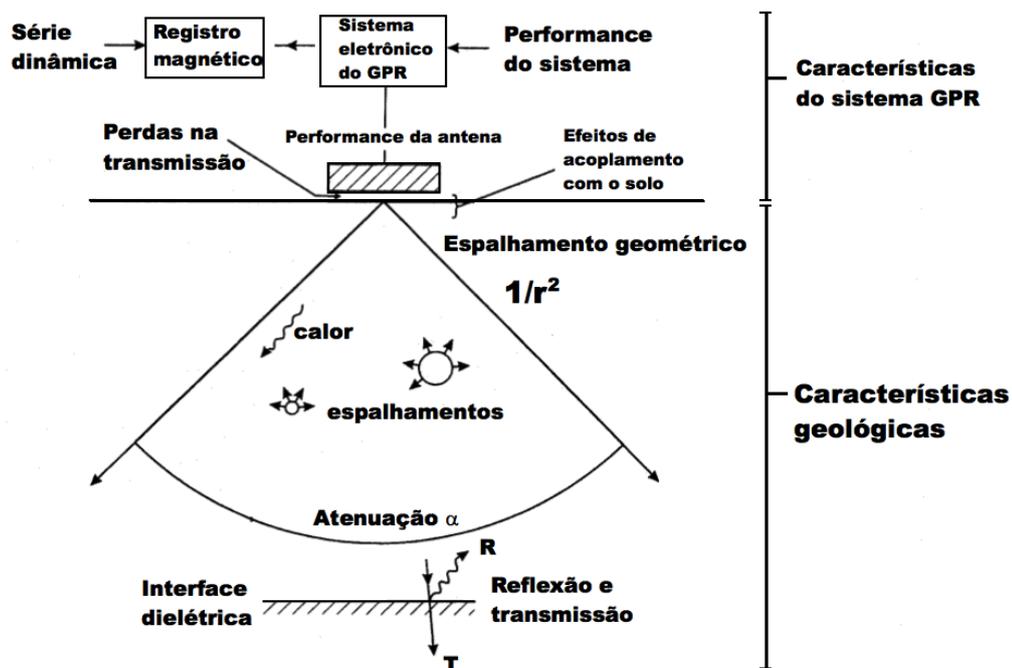


Figura 5 - Processos que influenciam na perda e atenuação do sinal de radar (REYNOLDS, 1997).

Quando o sinal encontra uma interface com propriedades eletromagnéticas distintas da camada litológica onde a onda estava a se propagar, ocorre uma partição do sinal, em que parte dele é refletido enquanto que a outra parte continua a sua trajetória, contudo com menos energia. Se acontecer de a onda encontrar uma estrutura com dimensões da mesma ordem de grandeza que o seu comprimento de onda, ocorrerá um espalhamento de energia de forma aleatória, o que resultará em hipérboles de difração. Essas hipérboles são consideradas como ruído no radargrama, no entanto muitas vezes podem ser úteis para localização de objetos enterrados em subsuperfície por exemplo.

Enquanto a onda se propaga pela subsuperfície, ela também perde energia por absorção, em que parte do sinal é absorvido pelo meio e transformado em calor. Além disso, a onda pode sofrer uma alteração no seu formato, dando origem a uma diferente *wavelet* em um processo chamado de dispersão, e, portanto, perde energia. Mecanismos de perdas dissipativas, como a condução elétrica e a relaxação dielétrica, contribuem para esses dois processos (TAKAHASHI, 2012). Todavia, perdas relacionadas com a relaxação da água só são significativas em frequências maiores que 500 MHz. Na dispersão, é comum que ocorra um alargamento da *wavelet*, visto que tanto os materiais que compõem a superfície terrestre quanto os artificiais agem como um filtro passa baixa.

Dentre todas as formas de perda de energia, a atenuação α é a mais importante, ela está ligada diretamente as propriedades eletromagnéticas e dielétricas do meio de propagação. Na Tabela 3 estão listados valores de coeficiente de atenuação para alguns materiais que compõem o solo. Consideremos que o pico de energia do campo eletromagnético transmitido é E_0 e que a uma dada distância x essa energia diminui para E_x . A razão entre as amplitudes do sinal no momento inicial da transmissão e em x será:

$$\frac{E_0}{E_x} = e^{-\alpha x} \quad (1.32)$$

Em que α representa o coeficiente de atenuação expresso por:

$$\alpha = \omega \left\{ \left(\frac{\mu \varepsilon}{2} \right) \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (1.33)$$

Onde, $\omega = 2\pi f$ sendo f é a frequência central do sistema em Hertz, μ permeabilidade magnética, geralmente considera próxima a do vácuo ($4\pi \times 10^{-7} H$

m), σ é a condutividade elétrica em S/m, e ε é a permissividade dielétrica do meio (REYNOLDS, 1997). Essa expressão só é válida em meios isentos de materiais magnéticos. O termo $\sigma/\omega\varepsilon$ representa o fator de perda do sistema P:

$$P = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \quad (1.34)$$

A atenuação aumenta rapidamente com frequências acima de 100 MHz devido à relaxação da água, que ocorre em torno dos 10 GHz (Davis e Annan, 1989). Um outro fator que pode influenciar em uma maior atenuação é o espalhamento do sinal devido a pequenas heterogeneidades no meio de propagação.

O fator atenuação do sinal A^* é calculado por Annan e Davis (1977) como:

$$A^* = 20 \log^{-\alpha} = 8,69 \alpha \quad (1.35)$$

Em um meio com baixas perdas, o coeficiente de atenuação possui um valor aproximado expresso por:

$$\alpha = \frac{1,69 \times 10^3}{(\varepsilon')^{1/2}} \text{ dB/m} \quad (1.36)$$

Em que $\sigma = \sigma_{dc} + \varepsilon''\varepsilon_0$ integra tanto a condutividade da corrente direta, quanto as perdas dielétricas. Para que a equação 1.35 seja verdadeira, é preciso que :

$$P = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \ll 1 \quad (1.37)$$

1.4.5. Aquisição dos dados na área de estudo

O equipamento GPR empregado no levantamento de campo foi o modelo SIR-3000, fabricado pela empresa GSSI™ (*Geophysical Survey Systems, Inc.*). O sistema de antenas utilizado foi o modo monoestático com a frequência central de 200 MHz, essa configuração permitiu uma janela de aquisição com tempo de ida e volta da onda (TWTT) de 400 ns, equivalendo a uma profundidade 19 m. Para a conversão de tempo em profundidade a constante dielétrica utilizada foi a de valor 10 para areia úmida que representa a velocidade de 0,09 m/ns (DANIELS *et al.*, 1995). Essa constante já foi validada em outra região com sistemas deposicionais holocênicos na Bacia de Pelotas (DILLENBURG *et al.*, 2011). O levantamento resultou em um perfil de cerca de 1,1 km (Figura 6) utilizando o método proposto por BARBOZA *et al.* (2014). Durante a aquisição de dados foram aplicados: filtro de passa banda vertical IIR (LP=430 MHz – HP=60 MHz), *Stack* horizontal de valor 3 e ganho.

1.4.6. Processamento

O perfil adquirido apresenta um dado muito bom (Figura 6), onde claramente observam-se as reflexões bloqueadas pelo início de um refletor com alta amplitude no sinal. Para o processamento desse perfil foram utilizados dois *softwares*: Prism2[®] e o Radan[™].

No Prism2[®] foi executado um pré-processamento, ou seja, uma visualização dos dados brutos (Figura 6), e aplicado o um ganho de tela a fim de se observar as principais reflexões. O processamento principal dos dados foi executado no Radan[™] onde inicialmente foi realizado o *background removal* e na sequência as outras etapas que são descritas abaixo.

1.4.6.1. Etapas de processamento

O *software* Radan[™] 6.6 da GSSI[™] (*Geophysical Survey System, Inc.*) se mostrou extremamente eficaz no processamento da linha respondendo ao objetivo do trabalho. Foram realizadas no total três rotinas para o processamento do perfil.

a) FIR FILTER

Esse filtro cria parâmetros iniciais onde através da utilização do campo *Background Removal* (200 traços) obtemos a retirada das linhas contínuas deixando apenas a parte divergente. E seguida aplicou-se o ajuste de frequências, nesse caso o parâmetro utilizado foi o dobro e a metade da frequência central da antena utilizada, respectivamente, 400 e 100 MHz.

b) RANGE GAIN

Essa ferramenta de processamento propicia o aumento da nitidez da linha, para facilitar o seu uso foi utilizado no campo *Gain Type* - EXPONENT, para flexibilizar o seu ganho. No campo Value – 38, neste campo algo entre 32 e 38 é o suficiente para aumentar a nitidez. No campo *Number of Points* – foi utilizado o número 16, de uma maneira geral com esse valor é possível ter um controle maior

de onde será dado o ganho; esse comando serve para dividir a linha de uma maneira que e possa achar locais pontuais de interesse.

c) HORIZONTE SCALING

Essa ferramenta trabalha a escala horizontal, aconselha-se colocar 2 no campo *Stacking* para uma melhor visualização da linha e um melhor empilhamento. Ao final do processamento foi obtida uma imagem (radargrama) mais nítida dos refletores em subsuperfície, a qual foi exportada através do Prism2[®] no formato JPG (Figura 7).

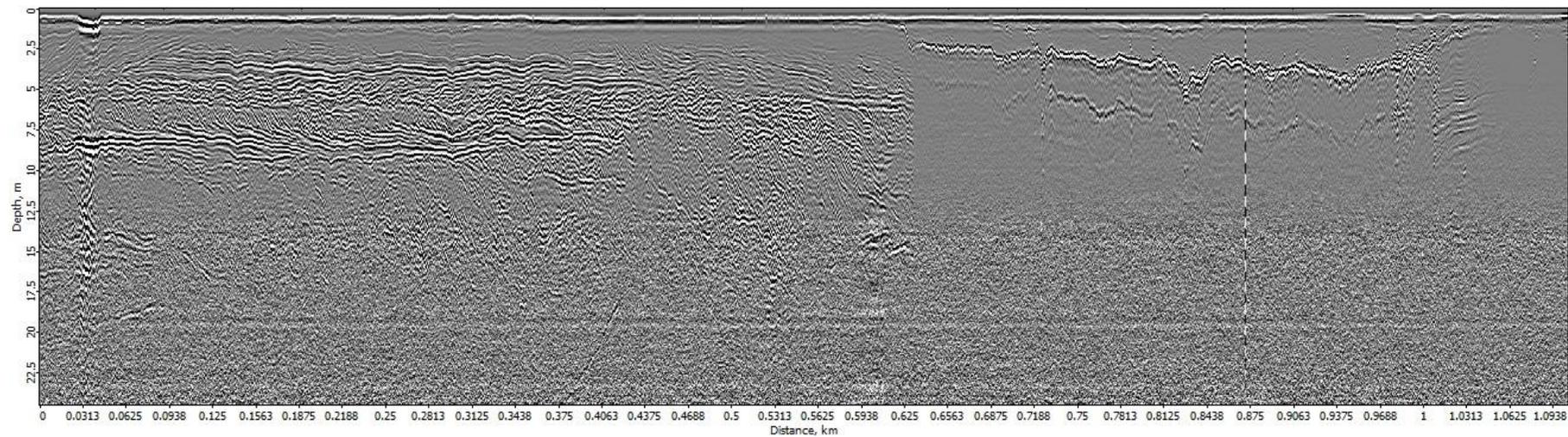


Figura 6 – Radargrama do perfil de GPR apresentando os dados brutos do levantamento.

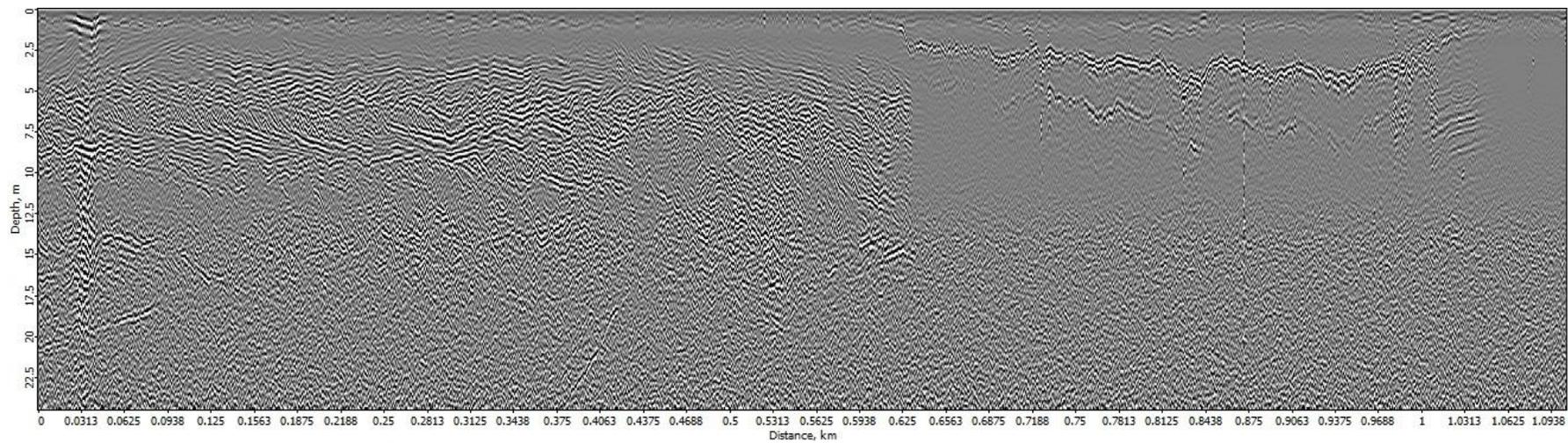


Figura 7 – Radargrama do perfil de GPR já com os dados processados.

1.4. Referências

- ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M. & SPAROVEK, G. 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 22: 711-728.
- ANGULO, R.J. & LESSA, G.C. 1997. The Brazilian sea-level curves: a critical review with emphasis on the curves from the Paranaguá and Cananéia regions. *Marine Geology*, 140, 1-2: 141-166.
- ANGULO, R.J., LESSA, G.C. & SOUZA, M.C. 2006. A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quaternary Science Reviews*, 25: 486-506.
- ANNAN, A.P., COSWAY, S.W. & REDMAN, J.D. 1991. Water table detection with ground penetrating radar. In: *International Congress of Society of Exploration Geophysical*, 61, 1991, Houston. Expanded Abstracts, Houston: SEG, p.494-496.
- ANNAN AP. 1992. Ground penetrating radar workshop notes. *Sensors and Software*, Incorporated, Mississauga, Ontario, 150 p.
- ANNAN, A.P. & DAVIS, J.L. 1997. Ground Penetrating Radar - Coming of age at last!! In: "Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration", A.G. Gubins, 515 - 522.
- AYUP-ZOUAIN, R.N., FERREIRA, H.P.L., BARBOZA, E.G & TOMAZELLI, L.J. 2003. Evidência morfológica de um paleocanal holocênico da Laguna Mirim nas adjacências do banhado Taim. II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa; IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário; II Congresso do Quaternário dos Países de Língua Ibéricas
- BARBOZA, E.G. & TOMAZELLI, L.J., 2003. Erosional features of the eastern margin of the Patos Lagoon, southern Brazil: significance for Holocene history. *Journal of Coastal Research*, SI 35: 260-264.
- BARBOZA, E.G., DILLENBURG, S.R., ROSA, M.L.C.C., TOMAZELLI, L.J. & HESP, P.A. 2009. Ground penetrating radar profiles of two Holocene regressive barriers in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 56: 579-583.
- BARBOZA, E.G., ROSA, M.L.C.C., DILLENBURG, S.R., TOMAZELLI, L.J. & AYUP-ZOUAIN, R.N. 2011a. Comportamento regressivo/transgressivo da linha de costa na bacia de Pelotas durante o Holoceno médio e tardio. In: López, R.A & Marcomini, S.C. (Ed.). *Problemática de Los Ambientes Costeiros*. Buenos Aires, Croquis, p. 15-30.
- BARBOZA, E.G., ROSA, M.L.C.C., HESP, P.A., DILLENBURG, S.R., TOMAZELLI, L.J. & AYUP-ZOUAIN, R.N. 2011b. Evolution of the Holocene Coastal Barrier of Pelotas Basin (Southern Brazil) - a new approach with GPR data. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 646-650.

- BARBOZA, E.G. ROSA, M.L.C.C. DILLENBURG, S.R. & TOMAZELLI, L.J. 2013. Preservation Potential of Foredunes in the Stratigraphic Record. *Journal of Coastal Research*, SI 65:1265-1270.
- BARBOZA, E.G., ROSA M.L.C.C. & CARON, F. 2014. Metodologia de Aquisição e Processamento em Dados de Georradar (GPR) nos Depósitos Quaternários da Porção Emersa da Bacia de Pelotas. In: VI Simpósio Brasileiro de Geofísica. Resumos Expandidos, 1: 1-6. DOI: 10.13140/2.1.3369.5047.
- BIANCINI DA SILVA, A., BARBOZA, E.G., ROSA, M.L.C.C. & DILLENBURG, S.R. 2014. Meandering Fluvial System Influencing the Evolution of a Holocene Regressive Barrier in Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 70, 687-692.
- BRIDGE, D., CUNNINGHAM, C.W., BUSS, L. & DESALLE, R. 1995. Class-level relationships in the phylum Cnidaria: molecular and morphological evidence. *Mol. Biol. Evol.* 12: 679-689.
- BRISTOW, C.S.E & JOL, H.M.2003. Ground penetrating radar in sediments: Geological Society of London, Special Publication 211, 366 p.
- BRISTOW, C.S. & PUCILLO, K. 2006. Quantifying rates of coastal progradation from sediment volume using GPR and OSL: the Holocene fill of Guichen Bay, south-east South Australia. *Sedimentology* 53, 769–788.
- BUYNEVICH, I.V., KLEIN, A.H.F., FITZGERALD, D.M., CLEARY, W.J., HEIN, C.J., VEIGA, F., ANGULO, R.J., ASP, N.E. & PETERMANN, R.M. 2011. Geological legacy of storm erosion along a high-energy indented coastline: northern Santa Catarina, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 1840-1844.
- CURRAY, J.R. 1964. Transgressions and regressions. In: Miller, R.L. (Ed), *Papers in Marine Geology*. Macmillan, New York, p. 175-203.
- DAVIS Jr., R.A. & HAYES, M.O. 1984. What is a wave dominated coast? *Marine Geology*, 60, 313-329.
- DANIELS, J.J. 1989. Fundamentals of ground penetrating radar. *In: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2, 1989, Golden. *Proceedings...*, Golden: SAGEEP 89, 62-142.
- DANIELS, J., ROBERTS, R. & VENDL, M. 1995. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, 33: 195-207
- DANIELS, D.J. 1996. *Surface penetrating radar*. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300p.
- DANIELS, J.J. 2000. *Ground Penetrating Radar Fundamentals*, USEPA Region 5.
- DANIELS, D.J. 2004. *Ground Penetrating Radar*, second edition. Institution of Electrical Engineers, London, UK.

- DAVIS Jr., R.A & HAYES, M.O. 1984. What is a wave dominated coast? *Marine Geology*, 60, 313-329.
- DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v.37, pp.531-551.
- DIAS, J.L., SAD, A.R.E., FONTANA, R.L. & FEIJÓ, F.J. 1994. Bacia de Pelotas. *Boletim de Geociências*. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 235-245.
- DILLENBURG, S.R. & HESP, P.A. 2009. *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. 1. ed. Heidelberg: Springer, v. 107. p. 380.
- DILLENBURG, S.R., BARBOZA, E.G. & ROSA, M.L.C.C. 2011. Ground Penetrating Radar (GPR) and Standard Penetration Test (SPT) records of a regressive barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 651-655.
- DILLENBURG, S.R. & BARBOZA, E.G. 2014. The Strike-Fed Sandy Coast of Southern Brazil. In: Martini, I.P.; Wanless H.R. (Eds.). *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences*. Geological Society, London, Special Publications 388, p. 333-352.
- DILLENBURG, S.R., BARBOZA, E.G., ROSA, M.L.C.C., CARON, F. & SAWAKUCHI, A.O. 2017. The complex prograded Cassino barrier in southern Brasil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7-6 ka. *Marine Geology*, 390: 106-119.
- FITZGERALD, D.M., CLEARY, W.J., BUYNEVICH, I.V., HEIN, C.J., KLEIN, A.H.F., ASP, N.E. & Angulo, R.J. 2007. Strandplain Evolution along the Southern Coast of Santa Catarina, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 50, 152-156.
- GODOLPHIM, M.F. 1985. Paleogeografia da região do Cassino no Município do Rio Grande, Brasil. *Pesquisas*, 17: 233-254.
- GOMES, A., TRICART, J.L.F. & TRAUTMANN, J. 1987. *Estudo Ecodinâmico da Estação Ecológica do Taim e seus Arredores*. Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre, 84p.
- GUERRA, A.T. & GUERRA, A.J.T. 2009. *Novo dicionário geológico geomorfológico*. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- HORN FILHO, N.O., BACHI, F.A. & VOLKMER, S. 1988. *Aspectos Geológicos da Estação Ecológica do Taim e Arredores, RS*. Convênio CECO-IG-UFRGS / SEMA, FINEP, Porto Alegre, 17 p.
- IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Estação Ecológica do Taim. Disponível em <http://www2.ibama.gov.br/unidades/estacoes/reuc/3017.htm>.
- KEAREY, P., BROOKS, M. & IAN, H. 2009. *Geofísica de exploração*. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de textos, 438 p.

- KELLER, G.V. 1987. Rock and mineral properties. *Investigations in Geophysics*, nº 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, v.1, p.13-51.
- LEAL, R.A., BARBOZA, E.G., BITENCOURT, V.J.R. BIANCINI DA SILVA, A. & MANZOLLI, R.P. 2016. Geological and Stratigraphic Characteristics of a Holocene Regressive Barrier in Southern Brazil: GIS and GPR Applied for Evolution Analysis. *Journal of Coastal Research*, SI 75: 750-754.
- LESSA G., ANGULO R.J., GIANNINI P.C.F. & ARAÚJO A.D. 2000. Stratigraphy and Holocene Evolution of a Regressive Barrier. In: South Brazil. *Marine Geology*, 165(1-4):87-108.
- LEWIS AJ & HENDERSON FM. 1998. Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In: F. Henderson, & A. Lewis (edits) Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of R. S., 3rd. Edition, Cap. 2., Amer. Soc. Phot. And R.S., John Wiley & Sons Inc. N.Y.
- MINISTÉRIO DO INTERIOR, DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS E SANEAMENTO. (1969). Projeto de Irrigação e Drenagem da Região do Taim (RS). Tomo II, Anexo 2 - Estudo Geológico e Geotécnico. Rio Grande, RS, 14 -38.
- MINISTÉRIO DO INTERIOR, DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS E SANEAMENTO. (1969). Estudo Edafológico Complementar da Viabilidade Técnico - Econômica de Transformação em Irrigação da Região de Taim, (RS). Tomo II, Zona Sul. 110 p.
- OLIVEIRA, J.F., BARBOZA, E.G. & BENAVENTE, J. 2016. Nearshore Dynamics and Holocene Evolution of the Coastal Barrier South of the Santa Marta Cape, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 75: 437-441.
- OLHOEFT, G.R. 1981. *Electrical properties of rocks, in Physical Properties of Rocks and Minerals*, in Touloukian, Y. S., Judd, W. R., and Roy, R. F., eds.: New York, McGraw-Hill, p. 257-330,
- OLHOEFT, G.R. 1996. Electrical, Magnetic, and Geometric Properties that determine Ground Penetrating Radar Performance. *IN: 6th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Tohoku University, Sendai, Japan, CD-ROM.
- PORSANI J.L. 1999. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista - São Paulo, 145 pp.
- POWERS, M.H. 1997. Modeling frequency dependent GPR. *The leading Edge*, v.16, nº 11, p. 1657-1662.
- REYNOLDS, J.M., 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester. West Sussex P019 1UD, Englad, pp. 681- 749.

- ROSA M.L.C.C., TOMAZELLI L.J., COSTA A.F.U. & BARBOZA E.G. 2009. Integração de métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) na caracterização do embasamento da região sudoeste da Bacia de Pelotas, sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(4): 641-657.
- ROCKETT, G.C., BARBOZA, E.G. & ROSA, M.L.C.C. 2016. Ground Penetrating Radar applied to the characterization of the Itapeva Dunefield, Torres, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 75: 323-327.
- ROSA, M.L.C.C., BARBOZA, E.G., DILLENBURG, S.R., TOMAZELLI, L.J. & AYUP-ZOUAIN, R.N. 2011. The Rio Grande do Sul (southern Brazil) shoreline behavior during the Quaternary: a cyclostratigraphic analysis. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 686.
- ROSA, M.L.C.C., HOYAL, D.C., BARBOZA, E.G., FEDELE, J. & ABREU, V.S. 2016. River-dominated deltas: upscaling autogenic and allogenic processes observed in laboratory experiments to field examples of small deltas in southern Brazil. In: Budd, D.A.; Hajek, E.A.; Purkis, S.J. (Eds.), *Autogenic Dynamics and Self-Organization in Sedimentary Systems*. SEPM Special Publication, 106: 176-197.
- ROSA, M.L.C.C., BARBOZA, E.G., ABREU, V.S., TOMAZELLI, L.J. & DILLENBURG, S.R. 2017. High-frequency sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. *Brazilian Journal of Geology*, 47(2): 183-207.
- SCARELLI F.M., BARBOZA E.G., CANTELLI L. & GABBIANELLI, G. 2017. Surface and subsurface data integration and geological modelling from the Little Ice Age to the present, in the Ravenna coastal plain, northwest Adriatic Sea (Emilia-Romagna, Italy). *Catena* 151: 1-15
- SENA SOBRINHO, M. (1961). Reconhecimento geológico nos banhados do Taim. *Bol. Geogr. do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 6 (11): 17-25.
- SMITH, D.G. & JOL, H.M. 1995. Ground penetrating radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments, *Journal of Applied Geophysics* 33: 93 - 100. STRATTON, J. A. *Electromagnetic Theory*. McGraw Hill, p. 558-561, 1941.
- SUGUIO, K. 1992. *Dicionário de Geologia Marinha*. São Paulo: T. A. Queiroz.
- TAKAHASHI, K., IGEL, J., PREETZ, H. & KURODA, S. 2012. Basics application of ground penetrating radar as tool for monitoring irrigation process, *Problems, Perspectives and Challenges of Agriculture Water Management*, Intech, 155 -1 80.
- TOMAZELLI, L.J., BARBOZA, E.G., DILLENBURG, S.R., ROSA, M.L.C.C., CARON, F. & LIMA, L.G. 2008. Implantação, preenchimento e desenvolvimento de vales incisos na porção sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Projeto PETROBRAS. Relatório Interno, 102p.
- VILLWOCK, J.A., TOMAZELLI, L.J., LOSS, E.L., DEHNHARDT, E.A., HORN FILHO, N.O., BACHI, F.A. & DENHARDT, B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. (ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 4, 79-97.

WARD, S.H. & HOHMANN, G.W. 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, ed. Misac N. Nabighian, v.1, (3), pp.131-31.

2. CORPO PRINCIPAL – ARTIGO SUBMETIDO

O artigo apresentado como corpo principal desta Dissertação foi submetido à Revista Brazilian Journal of Geology. A carta comprovando a submissão se encontra ao final dessa dissertação em Anexo.

**Ground Penetrating Radar -GPR signal attenuation in sands of Taim marshes,
southernmost Brazil**

Camila Trindade Lopes^{a*}, Eduardo Guimarães Barboza^b, Vinícius Abreu de Oliveira^c,
Israel R. Mathias dos Santos^d

^aPrograma de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500; 91501-970
Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil

^bDepartamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500; 91501-970 Porto Alegre, Rio Grande do
Sul, Brazil

^cUniversidade Federal do Pampa, Av. Pedro Anunciação, 111; 96570-000 Caçapava
do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil

^dUniversidade Federal Fluminense, Av. Gal. Milton Tavares de Souza, Campus da
Praia Vermelha – Boa Viagem, 24210-346, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil

* Corresponding author. Tel.:+55 55 999829532; Fax:. +55 51 33086340

E-mail addresses: camila.trindade.lopes@hotmail.com (C. T. Lopes).

ABSTRACT

Coastal regions have been the subject of research over the years, however these complex areas require additional investigations within the geosciences for a better understanding of the studied environments. The Ground Penetrating Radar (GPR) method has contributed to studies of coastal zones, especially because it presents a response and interpretation geophysical-geological satisfactory. However, GPR has some limitations, because it uses physical principles in its execution, and some properties in subsurface materials can cause signal attenuation or even keep the electromagnetic wave confined to a waveguide layer. The objective of this study is to understand and infer from a physical analysis and a geophysical-geological interpretation the factors that cause this phenomenon. The study area is located in Banhado do Taim (marshes), a region in southernmost Brazil, state of Rio Grande do Sul. The GPR profile covered a distance >1 km. The analysis was concentrated in 502.65 m of this extensive profile, because of loss of signal. Results indicate the existence of the waveguide layer, associated with predominant environment type, clay fraction and organic matter mixed with high humidity content, which contributed to high conductivity and low resistivity value. The integrated result is strong signal attenuation and entrapment of the electromagnetic wave.

KEYWORDS: GPR; Attenuation of Signal; Coastal Plain.

1. Introduction

GPR is a Geophysical method that aims at obtaining subsurface images highlighting type of rock or structure from a given location. GPR is commonly applied to shallow studies (Annan et al., 1991) and consists of a high frequency electromagnetic pulse antenna transmitting between 10 and 10000 MHz (Annan and Davis, 1997). The pulses propagate underground, interacting with subsurface materials to generate reflections and diffractions as the electrical and dielectric properties of the rocks vary, electromagnetic waves captured by a receiving antenna.

GPR method is widely used in geological studies and allowed the stratigraphic interpretation of a series of coastal deposit systems around the world (Bridge *et al.*, 1995; Bristow e Jol, 2003; Bristow *et al.*, 2006; Fitzgerald *et al.*, 2007; Buynevich *et al.*, 2011; Scarelli *et al.*, 2017). The method has been applied to studies of coastal evolution and stratigraphic analysis of Holocene barriers in the southern coast of Brazil (Barboza *et al.*, 2009, 2011ab, 2013, 2014a; Biancini Da Silva *et al.*, 2014; Dillenburg *et al.*, 2014, 2017; Leal *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2016; Rockett *et al.*, 2016; Rosa *et al.*, 2016, 2017). In this region, wind-dominated environments control geological materials present; some materials have physical properties that impede the reproduction of the signal obtained by the GPR for a qualified response of subsurface characterization.

In GPR surveys, common energy losses and signal attenuation of the electromagnetic wave emitted by the transmitting antenna affect the data. Energy losses generate a problem in the acquisition of data because they limit the depth of penetration of the electromagnetic wave and consequently hinder the observation of structures or subsurface layers.

Loss of energy can be caused by a number of factors from the moment of signal irradiation by the transmitting antenna until register by the receiving antenna. These factors include antenna coupling, loss by spherical divergence, diffraction, dispersion, absorption and attenuation. In this study, we focus energy loss of the GPR signal by attenuation from a correlation and physical and geological interpretation.

Physical properties of the subsurface materials are directly linked to the quality of the GPR data, so characterization of the studied environment leads to understanding physical properties causing signal attenuation. The extense marshy area of Banhado do Taim requires understanding of its geological structure, so we used GPR for the characterization. The attenuation of signal encountered durign the survey led to three different hypotheses that are presently tested: content of clay, organic matter or humidity. We conclude that all three causes are significant in varying proportions.

2. Location and general aspects of the study area

Banhado do Taim is located in southmost Brazil (Fig. 1), in the emerged part of the Pelotas Basin between parallels 28°S and 35°S and meridians 46°W and 53°W (Fig. 2).The region is a large natural breeding environment of animals and plants distributed in marshes, fields, ponds, sandy beaches and coastal dunes.

According to Dias *et al.* (1994), the Pelotas basin occupies two well defined portions: an emerged area with about 40,000 km² constituting the Coastal Province of Rio Grande do Sul and an area of approximately 210,000 km² submerged down to 2,000 m isobath (Continental Elevation and Abyssal Plain).

Depositional systems of the study area

The study area is included in the barrier-lagoon systems proposed by Villwock *et al.* (1986). Each of these barrier-lagoon systems corresponds to a high-frequency depositional sequence (Rosa *et al.*, 2011, 2017). According to Dillenburg and Barboza (2014), Banhado do Taim is at the interface between a coastal projection to the south and the beginning of the embayment of the Rio Grande region, called the Albardão-Estreito sector, with a length of 205 km.

The location where the GPR profile was acquired is in the northern part of the segmentation of Pleistocene barriers II and III, represented by the installation of valleys in Barrier IV system incised during sea level lowering (Rosa *et al.* 2009).

3. GPR Method

The GPR is a geophysical method with physical principle in the emission of electromagnetic waves generated through a short high frequency pulse, irradiated into the ground by a transmitting antenna, and captured by a receiving antenna up on return to the surface, thus leading to characterization of the subsurface. The result of a GPR profile is an image of the subterranean variations of the electric properties as a function of the electromagnetic pulse travel time (Nunes, 2002).

3.1. GPR Electromagnetic Wave Physics in the study area

The GPR is based on Maxwell's equations that describe mathematically the physics of generation and propagation of fields and electromagnetic waves. Maxwell's equations are a reformulation of four laws already known at the time and are: Faraday's Law, Ampère's Law, Gauss's Law for electric and magnetic field, given in equations 1.0 to 1.2.

- Faraday's Law

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.0)$$

- Ampère's Law

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.1)$$

- Gauss's Law

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1.2)$$

These equations do not support the interpretation of the physical characteristics of the medium, making it necessary to associate the constitutive relations. As a consequence, physical properties of materials connect electromagnetic fields of a source with a medium through the physical properties of the materials.

Geological materials are generally semi-conductor or dielectric and are characterized by three physical properties: electrical conductivity σ , dielectric permittiveness ϵ and magnetic permeability μ .

Each property can be interpreted separately and reproduces some characteristics of interest of studied material, representing its behavior in the medium and interaction with the electromagnetic wave.

Depth of signal penetration is inversely proportional to the frequency of the electromagnetic wave. The humidity content of the soil as well as the soil type influences the quality of the radar signal (Lewis and Handerson, 1998).

3.2 Data Acquisition

GPR equipment used in the field survey was the SIR-3000 model, manufactured by GSSI TM (Geophysical Survey Systems, Inc.).

The antenna system used was the monostatic mode with the center frequency of 200 MHz. This configuration allowed a window of acquisition and time of return of the wave (TWTT) of 400 ns, equivalent to 19 m depth. For the conversion of time to depth, the dielectric constant used was a value of 10 for wet sand representing a velocity of 0.09 m/ns (Daniels *et al.* 1995). This constant was validated in another region with Holocene depositional systems in the Pelotas Basin (Dillenburg *et al.*, 2011). The survey resulted in a profile of about 1.1 km (Fig. 3) using the method proposed by Barboza *et al.* (2014). During the acquisition of data, conditions applied were vertical band pass filter IIR (LP = 430 MHz - HP = 60 MHz), horizontal Stack of value 3 and gain.

3.3 Data processing

The acquired profile yielded high quality data, displaying the beginning of a waveguide layer. The analysis of raw data (Fig. 3) is significant, but two software's were used in the process: Prism2[®] e o Radan[™] (Fig. 4) for a better visualization of the reflectors.

4. Results

Significant results of the detailed survey were obtained from point 0.5625 km (Fig. 5) in a total length of 1.0625 km (Fig. 4). Interpretations and physical and geological correlations are compiled into three sectors, because of the changes observed. These are separated below in Sector 1, Sector 2 and Sector 3.

Sector 1

Sector 1 (S1) has thickness varying laterally between approximately 2.5 and 3.5m. This sector changes composition laterally from 0.625 km, where its physical

properties change. The radargram (Fig. 4) shows that laterally there was a significant loss of signal from point 0.625 km. S1 is shallow (Fig. 5), is the youngest environment with greater wind influence (Fig. 2), short time to deposition, affecting grain accommodation.

Sector 2

Sector 2 (S2) varies thickness around 5 m. The type of material is similar to S1, but with a higher compaction of the grains because there was longer time of accommodation. In the coastal zone, S2 is older than S1 because as observed in direct link. Permittivity ϵ in S2 is greater than S1.

In the radargram (Fig. 4), the existence of a type of depositional environment of the coastal zone is marked. Reflector indicates a tendency either to the right or to the left, typical behavior of environments dominated by wind, aeolian deposits. S2 does not change laterally along of profile, as observed in the radargram (Fig. 4), but has a lateral continuity with the same type of material. The loss of signal from 0,625 km on occurs because S3 is a waveguide, i.e., preventing the electromagnetic wave from propagating in the subsurface by any physical properties that may exist in that layer.

Sector 3

Sector 3 (S3) starts at a distance of approximately 0.625 km, at a shallow depth of less than 2 m reaching 22.5 m depth which is the maximum GPR range in this profile (Figs. 4 and 5).

This is the most complex area because there is a total loss of signal, that is, in S3 the electromagnetic wave suffers the maximum attenuation. Actually, the wave is

subjected to a medium that is behaving as a waveguide layer making it impossible to pass. This observation explains the hypotheses of attenuation.

- Hypothesis 1 - Existence of Organic Matter

According to studies by Gazulha (2004), Banhado do Taim is rich in specific diversity compared to other coastal ecosystems in Rio Grande do Sul. The area has large volume of organic matter. Kley (2012) concluded in his study the existence of polymorphisms whose frequency and relations are direct reflexes of paleoenvironment. A zooplankton community is strongly associated with changes in water level. Level fluctuations are recognized as important factor for the functioning of lake ecosystems, emerging as a determinant element in conservation, especially shallow lakes associated with wetlands, which are particularly sensitive to rapid changes in levels and water intake in systems.

Organic matter in the soil forms soluble and insoluble complexes with metal ions and hydroxides disseminated in the medium that interacts with clay minerals and binds these particles, besides contributing to the retention of water in the soil, resulting in an attenuation of electromagnetic wave.

- Hypothesis 2 - Humidity

One of the factors that created the waveguide layer in S3 is the moisture index of the medium. The region has high rainfall and is often flooded, indicating that the type of S3 material is imprisoning water, causing the greater saturation in this area than others. This entrapment may be caused by pores of material that is absorbing signal energy during the relaxation process (Daniels, 2004).

Water present in the soil has an important role in the propagation of the signal generated by the radar. Water dissolves salts present in soil and facilitates the movement of ions, causing the energy of the electromagnetic waves to be transformed into electrical current, dissipating and attenuating the transmitted signal. Therefore, any volume of capillary water is sufficient to influence electrical conductivity even in dry soils (Doolittle et al., 2007). Water content in pores also has a strong influence on the dielectric behavior of soil.

- Hypothesis 3 - Clay Content

As many studies indicate, one of the factors contributing to the increase in the electrical conductivity of the medium is clay content of soil and rocks. In coastal environments, this type of material is common and may appear mixed with organic matter. Because it is a shallow area, S3 may also contain considerable amount of clay in its composition, in addition to organic matter and humidity.

5. Discussions

From the interpretation of the radargram (Figs. 4 and 5), it was possible to verify the existence of three sectors, S1, S2 and S3. In shallow areas, it is common to infer that lithology does not vary significantly in low depth. However, this type of environment usually presents large lateral variation. From the results, we verify that:

Sector 1

In lithologies of this type, the grain unconsolidation or lack of accommodation results in disruption of dielectric constant and creation of area with lower signal. The second constitutive relation of the medium, permittivity of the material ϵ , has the

function of direct proportionality constant between the electric displacement vector \vec{D} and the electric field vector \vec{E} . ϵ expressed in physical terms, the amount of electrical energy stored and lost, through the creation of an internal electric field (between ions and molecules), due to induced displacements, when molecules and ions are subjected to a variable external electric field (Olhoeft, 1996; Powers, 1997).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.3)$$

According to Annam (1997), both the electrical conductivity and the permittivity are important because they directly affect the attenuation and propagation of the radar waves, that is, in places where the material presents a low ϵ the wave will have a \vec{D} proportional to this value. The hypothesis in this sector is that the material may have properties that are causing the signal loss explained by low value of ϵ .

Ward and Hohmann (1987) suggest that conductivity is dominant for low-frequency EM waves (<1 MHz), while at high frequencies (>1 MHz) the dielectric permittivity is dominant. The relative permittivity ϵ_r and the dielectric constant of materials k is defined by equation:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_r} \quad (1.4)$$

The lower the dielectric constant k , the more conductive; it will result in a greater attenuation electromagnetic wave. Thus, it should be noted that the dielectric constant k is associated with the signal penetration power in subsurface. Main point is the permittibility and permeability, the first connected to the electric field and the second to the electromagnetic field. The resultant of this vector product corresponds to GPR wave.

Other important parameters that determine the propagation of electromagnetic waves as well as the resolution and penetration of the signal are:

Wavelength λ ,

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.5)$$

and the depth of penetration of the signal, which translates the ability to investigate the method, is expressed by the attenuation, given by:

$$\alpha = 1,636 \frac{\sigma_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.6)$$

By physically analyzing the radargram, S1 has dielectric constant k lower than S2, because of the time to accommodate the grain. This is because of the coastal zone environment with the presence of aeolian deposits, lower than S2 that is older than S1.

Sector 2

Through the analysis of the radargram (Fig. 4 and 5), S2 yielded the best response to GPR signal. Well-marked reflectors characterize aeolian environments to the point where a waveguide layer (S3) arises, preventing the signal from being captured by the receiving antenna of the apparatus.

S2 is a physically older relative to S1; S2 has a dielectric constant k best established with respect to S1 following laterally a pattern. It is only possible to infer this by taking into account that S3 is behaving like a waveguide, not allowing the passage of the wave to another medium, keeping it trapped in that layer (S3).

In such environments, the greater the grain accommodation the greater the resulting value indicating that the electric field requires little load to exist, if compared to a lower k value. Therefore, the electromagnetic wave will have a better signal path and penetration; the higher the k value, the better the GPR signal response.

Sand is the main sediment of this type of deposit and has an electrical conductivity value σ of 0.14 mS/m, a relative dielectric constant value ϵ_r ranging from 2-6, and a low attenuation value α which is 0.14 dB/m. This results in a qualified response to the GPR method in areas of aeolian deposits. Recalling that the value of ϵ_r in air is 1, a value very close to sand; this is a low value, however, as k is inversely proportional to ϵ_r so the signal attenuation in this type of material will be low.

Sector 3

S3 was the great challenge of physical interpretation of this work because of greater attenuation of electromagnetic wave. To evaluate hypotheses, the types of materials present in this area are significant and the reason for causing this signal attenuation and preventing the electromagnetic wave path.

Considering the type of environment in which the geophysical campaign was carried out and the conclusions of work carried out in the area (Gazulha, 2004) or in areas that present similar characteristics (Rodrigues, 2004), three main factors contribute to the loss of electromagnetic signal wave in this layer, and they are: a) existence of organic matter, b) humidity e c) presence of clay.

a) Existence of Organic Matter

Soils and sediments contain a wide variety of organic materials, ranging from simple sugars and carbohydrates to complex proteins, fats, waxes and organic acids (Schumacher, 2002). Organic matter that composes the soil forms soluble and insoluble complexes with metallic ions and hydroxides disseminated in the medium, interacts with clay minerals and binds these particles, besides retaining water in the ground.

The environment in which data were collected is a large natural breeding ground and according to Gazulha (2004), this is a region with a great density and richness of living organisms. We observed a large accumulation of organic material that is functioning physically as a barrier to transmission of electromagnetic wave.

Attenuation is explained physically by the first constitutive law, known as electrical conductivity σ . This factor expresses the ability of a body to conduct electric current (Keller, 1987). According to equation 1.6, increase in conductivity is intrinsically linked to attenuation of electromagnetic signal.

Decomposition process of organic matter forms soluble and insoluble materials that act with the properties of the materials in subsurface and are able to contribute to retention of water in soil, causing increase in layer conductivity.

The reflection coefficients R and transmission of the interface T of the electromagnetic wave are intrinsically correlated and described according to the intrinsic impedances Z of each subsurface layer. Considering medium 1 as the medium in which the wave propagates and medium 2 the surface where the wave was reflected we have:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1.7)$$

$$T = 1 - R = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (1.8)$$

Where $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$ where μ is the magnetic permeability and ϵ is the permittivity.

Therefore it is possible to verify through formalizations 1.7 and 1.8 that everything that does not reflect transmits.

In nonconductive materials, i.e., low losses, the coefficient R can be simplified as a function of the relative permittivity ϵ' (Daniels, 2004):

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon'_1} - \sqrt{\varepsilon'_2}}{\sqrt{\varepsilon'_1} + \sqrt{\varepsilon'_2}} \quad (1.9)$$

b) Humidity

Soil humidity content as well as soil type influences backscatter of radar signal. These factors also affect the penetration power of the signal in the soil, because the higher the frequency and the humidity value of the subsurface material, the lower the signal penetration and reach, which favors a higher reflectivity and potentially a greater backscatter (Lewis and Handerson, 1998).

The Taim region has relatively high rainfall rate varying between 1.000 and 1.500 mm per year, meaning the humidity of this area is quite significant since, besides the pluviometric water, there are areas that are flooded and, as its name suggests, is an area of wetland that brings us to a saturated environment.

Again, it is possible to associate signal attenuation with a proportionality factor, called electrical conductivity (σ) equation 1.6.

Assuming that S3 has ground moisture greater than S1 and S2, the physical explanation for this loss of signal is based on the values of electrical conductivity σ , dielectric constant ε_r and attenuation α , which are respectively 6.9 mS/m, 25 e 2.25 dB/m for saturated sandy soils. Comparing areas S1 and S2 with S3 a great difference is perceived between physical properties of materials laterally and in depth.

c) Presence of clay in the S3

The presence of clay in subsurface causes a greater attenuation of the signal of the electromagnetic wave; high clay content in soil and high electrical conductivity of the medium contribute most to the low efficiency of the method, since they are directly connected to the attenuation of the GPR signal.

A saturated clayey soil has an electrical conductivity value σ of 6.9 mS/m, a dielectric constant ϵ_r of 15 and an attenuation α of 21 dB/m.

Thus, in addition to S3 presenting sandy soil more saturated with a mixture of considerable organic matter, a clay fraction adds to the other factors to cause a waveguide layer.

Physically, the waveguide is a material that has k lower than the surrounding materials (inverse for permittivity) so the electromagnetic wave has preference for transmission by the material or layer of lower k .

In this case, S3 is functioning as a waveguide because the electromagnetic wave cannot leave this layer, making it impossible to travel between S2 that is below S3.

6. Conclusions

Conductivity σ , or its inverse, resistivity ρ , can vary up to 20 orders of magnitude for geological materials near surface. Factors that directly affect this fluctuation are: humidity content, porosity, salinity, proportion of clay fraction and presence of conductive minerals.

Waveguide layer is associated to the type of dominant environment. Clay and organic matter in the area mixed with high moisture content contributed to a high conductivity value, resulting in strong signal attenuation and entrapment of the electromagnetic wave.

The results of this work show the efficiency of GPR method for areas with low clay content, low organic matter content and low humidity content, which results

respectively in a high electrical resistivity and low conductivity, as well as inefficiency in mixing sites of sandy and clayey soils saturated with organic matter.

Through physical analysis, equations do not have the capacity to provide the physical characteristics of subsurface sectors, so it is necessary to associate them with the constitutive relations so that their physical properties translate the interaction between the electromagnetic fields of a source with lithology through physical properties of materials. Therefore, electromagnetic properties depend on the composition and humidity of materials, both controlling the speed of propagation of the electromagnetic wave and its attenuation.

Acknowledgments

Camila acknowledges a scholarship from CAPES and support and infrastructure from UFRGS.

7. References

- Annan, A.P., Cosway, S.W. & Redman, J.D., 1991. Water table detection with ground penetrating radar. In: *International Congress of Society of Exploration Geophysical*, 61, 1991, Houston. Expanded Abstracts, Houston: SEG, p.494-496.
- Annan, A.P. & Davis, J.L. (1997). Ground Penetrating Radar - Coming of age at last!! In: "*Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration*", A.G. Gubins, 515 - 522.
- Barboza, E.G., Dillenburg, S.R., Rosa, M.L.C.C., Tomazelli, L.J. & Hesp, P.A. 2009. Ground penetrating radar profiles of two holocene regressive barriers in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 56: 579-583.
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J. & Ayup-Zouain, R.N. 2011a. Comportamento regressivo/transgressivo da linha de costa na bacia de Pelotas durante o Holoceno médio e tardio. In: López, R.A & Marcomini, S.C. (Ed.). *Problemática de Los Ambientes Costeros*. Buenos Aires, Croquis, p. 15-30.
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Tomazelli, L.J. e Ayup-ZOUAIN, R.N. 2011b. Evolution of the Holocene Coastal Barrier of Pelotas Basin (Southern Brazil) - a new approach with GPR data. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 646-650.
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, S.R. & Tomazelli, L.J. 2013. Preservation Potential of Foredunes in the Stratigraphic Record. *Journal of Coastal Research*, SI 65:1265-1270.

- Bridge, D.C.W., Cunningham, L.B., & Desalle, R. 1995. Class-level relationships in the phylum Cnidaria: molecular and morphological evidence. *Mol. Biol. Evol.* 12: 679–689.
- Barboza, E.G.; Rosa M.L.C.C. & Caron, F., 2014. Metodologia de Aquisição e Processamento em Dados de Georradar (GPR) nos Depósitos Quaternários da Porção Emersa da Bacia de Pelotas. In: *VI Simpósio Brasileiro de Geofísica. Resumos Expandidos*, 1: 1-6. DOI: 10.13140/2.1.3369.5047.
- Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, S.R., Biancini Da Silva, A. & Tomazelli, L.J. 2014a. Stratigraphic analysis applied on the recognition of the interface between marine and fluvial depositional systems. *Journal of Coastal Research*, SI 70, 205-210.
- Biancini da Silva, S.A., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C. & Dillenburg, S.R. 2014. Meandering Fluvial System Influencing the Evolution of a Holocene Regressive Barrier in Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 70, 687-692.
- Bristow, C.S. & Jol, H.M. 2003. Ground penetrating radar in sediments: *Geological Society of London*, Special Publication 211, 366 p.
- Bristow, C.S. & Pucillo, K. 2006. Quantifying rates of coastal progradation from sediment volume using GPR and OSL: the Holocene fill of Guichen Bay, south-east South Australia. *Sedimentology* 53, 769–788.
- Buynevich, I.V., Klein, A.H.F., Fitzgerald, D.M., Cleary, W.J., Hein, C.J., Veiga, F., Angulo, R.J., ASP, N.E. & Petermann, R.M. 2011. Geological legacy of storm erosion along a high-energy indented coastline: northern Santa Catarina, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 1840-1844.

- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Sul. Programa de Geologia do Brasil. Integração, Atualização e Difusão de Dados de Geologia do Brasil. Mapas Geológicos Estaduais em Sistema de Informações Geográficas - SIG. Escala 1:750. 000. DVD ROM.
- Daniels, J., Roberts, R., Vendl, M. 1995. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, 33: 195-207.
- Daniels, D.J. (2004) Ground Penetrating Radar, second edition. Institution of Electrical Engineers, London, UK.
- Dias, J.L., Sad, A.R.E.; Fontana, R.L. & Feijó, F.J. 1994. Bacia de Pelotas. *Boletim de Geociências*. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 235-245.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C. 2011. Ground Penetrating Radar (GPR) and Standard Penetration Test (SPT) records of a regressive barrier in southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 651-655.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G. 2014. The Strike-Fed Sandy Coast of Southern Brazil. In: Martini, I.P.; Wanless H.R. (Eds.). Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences. *Geological Society*, London, Special Publications 388, p. 333-352.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Caron, F., Sawakuchi, A.O. 2017. The complex prograded Cassino barrier in southern Brasil: Geological and morphological evolution and records of climatic, oceanographic and sea-level changes in the last 7-6 ka. *Marine Geology*, 390: 106-119.
- Doolittle, J.A., Minzenmayer, F.E., Waltman, S. W., Benham, E.C., Tuttle, J. W. & Peaslee, S.D. 2007. Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States, *Geoderma* 141: 416 - 421.

- Fitzgerald, D.M., Cleary, W.J., Buynevich, I.V., HEIN, C.J., KLEIN, A.H.F., ASP, N.E. & Angulo, R.J. 2007. Strandplain Evolution along the Southern Coast of Santa Catarina, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 50, 152-156.
- Gazulha, V. Porto Alegre (2004). Comunidade Zooplantônica associada a banhado e lagoa interna no sistema hidrológico do Taim, costa Sul do Rio Grande do Sul, Brasil. MS Dissertation, Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 127 p.
- Keller, G.H., 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa: *Society of Exploration Geophysicists*, ed. MisacN. Nabighian, v.1, (3), pp.13-24.
- Kley, A.S. Porto Alegre, 2012. Reconstituição paleogeográfica e Paleoambiental no Taim: estudo dos furos de sondagem ta6 e ta7, na porção sul da Planície costeira do rio grande do sul. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 94 p.
- Leal, R.A., Barboza, E.G., Bitencourt, V.JR. Biancini da Silva, A. & Manzolli, R.P. 2016. Geological and Stratigraphic Characteristics of a Holocene Regressive Barrier in Southern Brazil: GIS and GPR Applied for Evolution Analysis. *Journal of Coastal Research*, SI 75: 750-754.
- Lewis, A.J. & Henderson, F.M. 1998. Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In: F. Henderson, & A. Lewis (edits) Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of R. S., 3rd. Edition, Cap. 2., Amer. Soc. Phot. And R.S., John Wiley & SonsInc. N.Y.
- Nunes, C.M.F. 2002. Aplicações do GPR (Ground Penetrating Radar) na caracterização de perfis de alteração de rochas gnáissicas do Rio de Janeiro. MS Dissertation, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- Oliveira, J.F., Barboza, E.G. & Benavent, E.J. 2016. Nearshore Dynamics and Holocene Evolution of the Coastal Barrier South of the Santa Marta Cape, Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 75: 437-441.
- Olhoeft, G.R. 1996. Electrical, Magnetic, and Geometric Properties that determine Ground Penetrating Radar Performance. *IN: 6th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Tohoku University, Sendai, Japan, CD-Room.
- Powers, M.H. 1997. Modeling frequency dependent GPR. *The leading Edge*, v.16, nº 11, p. 1657-1662.
- Rockett, G.C., Barboza, E.G. & Rosa, M.L.C.C. 2016. Ground Penetrating Radar applied to the characterization of the Itapeva Dunefield, Torres, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 75: 323-327.
- Rodrigues, S.I. São Paulo, 2004. Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. MS Dissertation, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 102 p.
- Rosa, M.L.C.C., Barboza, E.G., Dillenburg, S. R., Tomazelli, L.J., AYUP-ZOUAIN, R.N. 2011. The Rio Grande do Sul (southern Brazil) shoreline behavior during the Quaternary: a cyclostratigraphic analysis. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 686.
- Rosa, M.L.C.C., Hoyal, D.C., Barboza, E. G., Fedele, J., Abreu, V.S. 2016. River-dominated deltas: upscaling autogenic and allogenic processes observed in laboratory experiments to field examples of small deltas in southern Brazil. In: Budd, D.A.; Hajek, E.A.; Purkis, S.J. (Eds.), *Autogenic Dynamics and Self-Organization in Sedimentary Systems*. SEPM Special Publication, 106: 176-197.

- Rosa, M.L.C.C., Barboza, E.G., Abreu, V.S., Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R. 2017. High-frequency sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. *Brazilian Journal of Geology*, 47(2): 183-207.
- Scarelli, F.M., Barboza, E.G., Cantelli, L. & Gabbianelli, G. 2017. Surface and subsurface data integration and geological modelling from the Little Ice Age to the present, in the Ravenna coastal plain, northwest Adriatic Sea (Emilia-Romagna, Italy). *Catena* 151: 1-15
- Schumacher, B.A. 2002. Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments, United States Environmental Protection Agency.
- Villwock, J.A., Tomazelli, L.J., Loss, E.L., Dehnhardt, E.A., Horn Filho, N.O.; Bachi, F.A.; Denhardt, B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In: Rabassa, J. (ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 4, 79-97.
- Ward, S.H. & Hohmann, G.W., 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa: *Society of Exploration Geophysicists*, ed. Misac N. Nabighian, v.1, (3), pp.131-311.

Figure 1 – Location of the GPR profile in the study area. Source: Satellite image generated by Google Earth.

Figure 2 - Geological detail map of the study area. Source: Modified from CPRM 2008.

Figure 3 - Radargram of the GPR profile showing the raw data.

Figure 4 - Radargram generated from the GPR profile performed in the study area with the processed data.

Figure 5 – Interpretation of the study area from the radargram. Identification of three areas through the behavior of the electromagnetic wave.

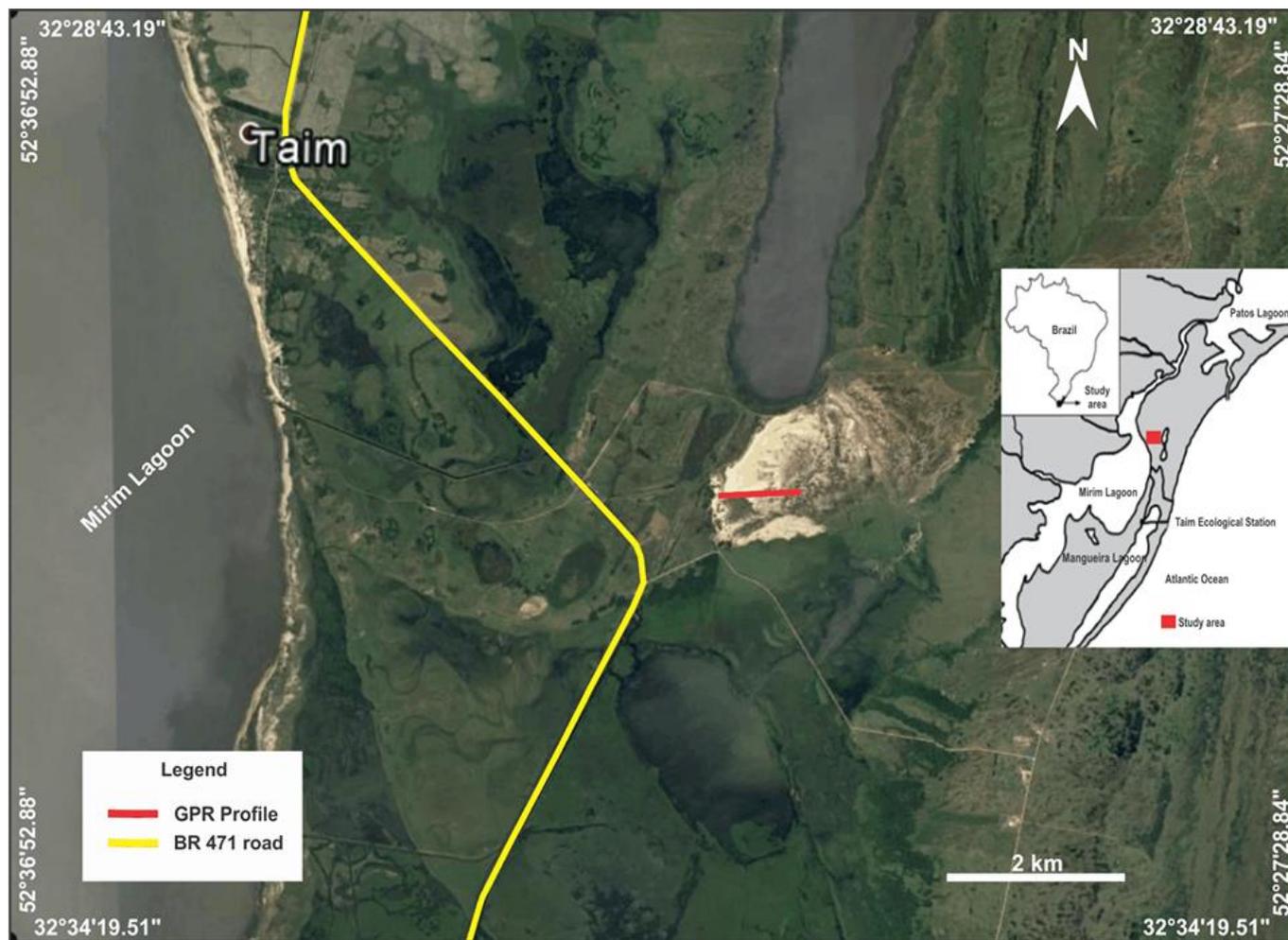


Figure 1

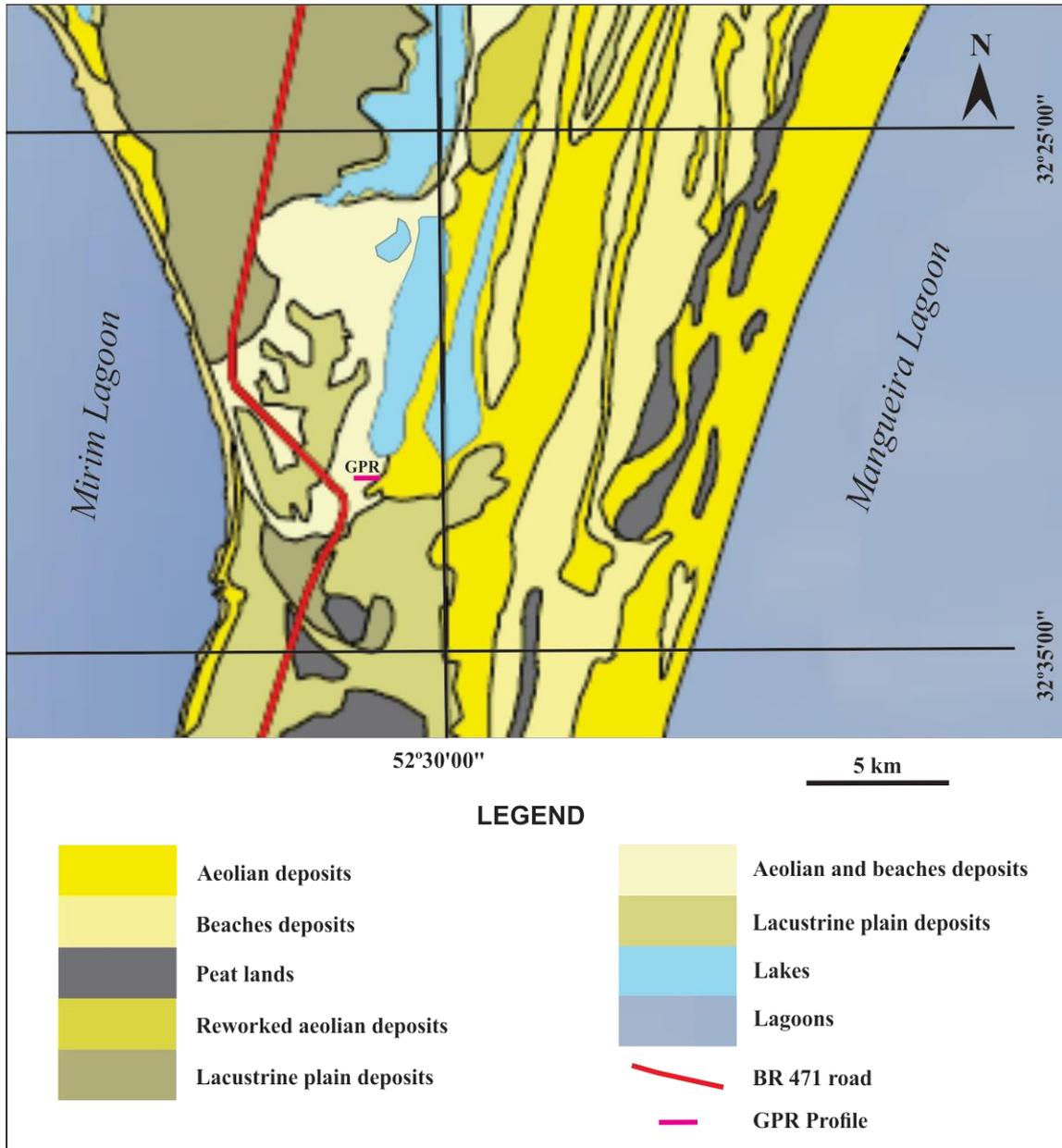


Figure 2

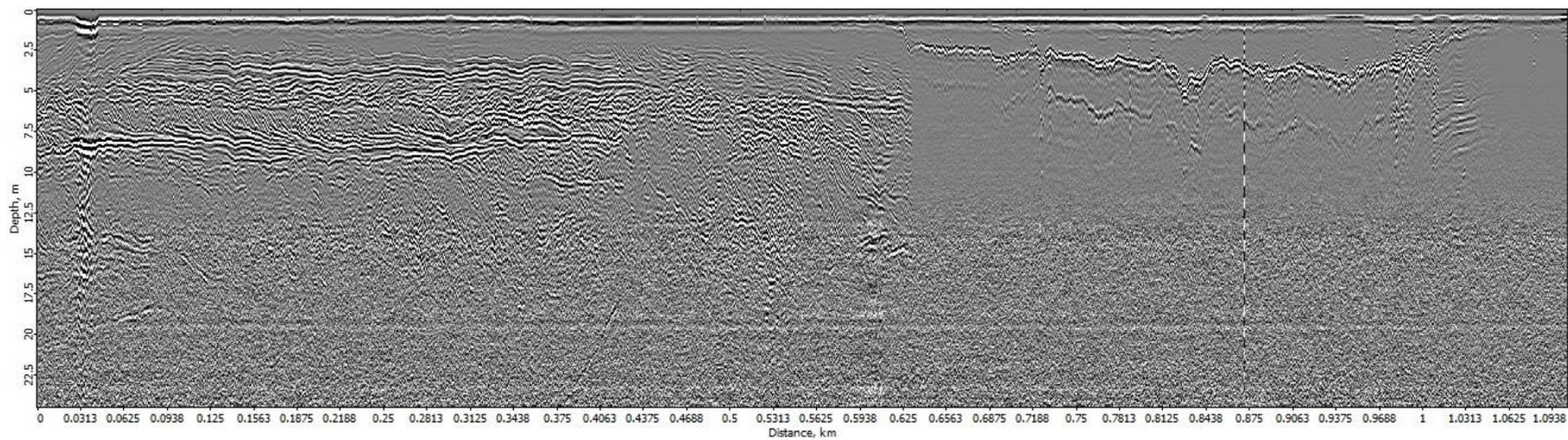


Figure 3

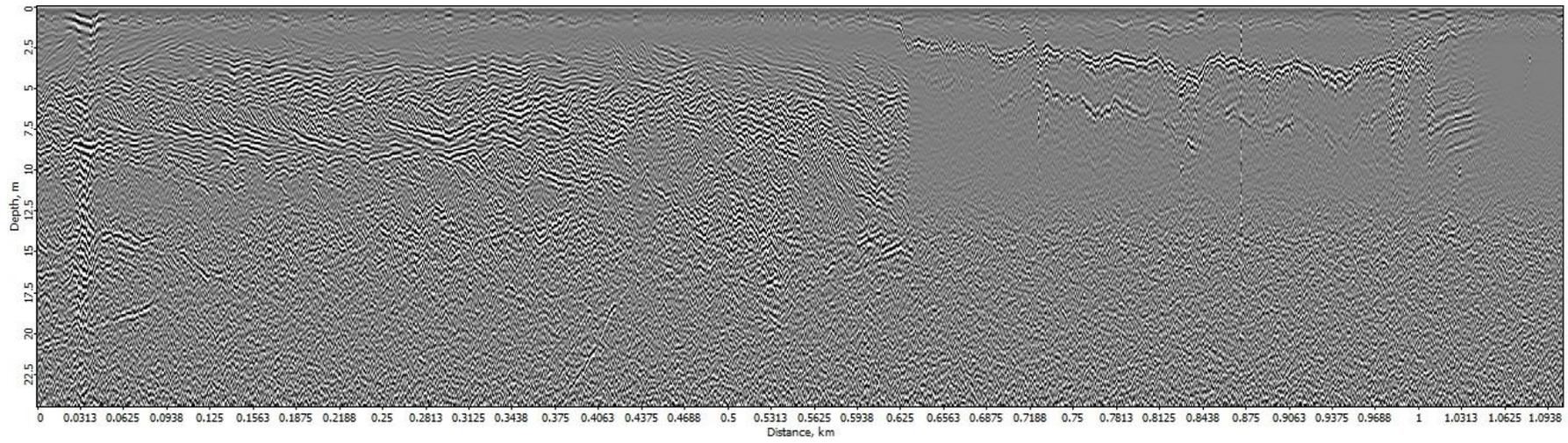


Figure 4

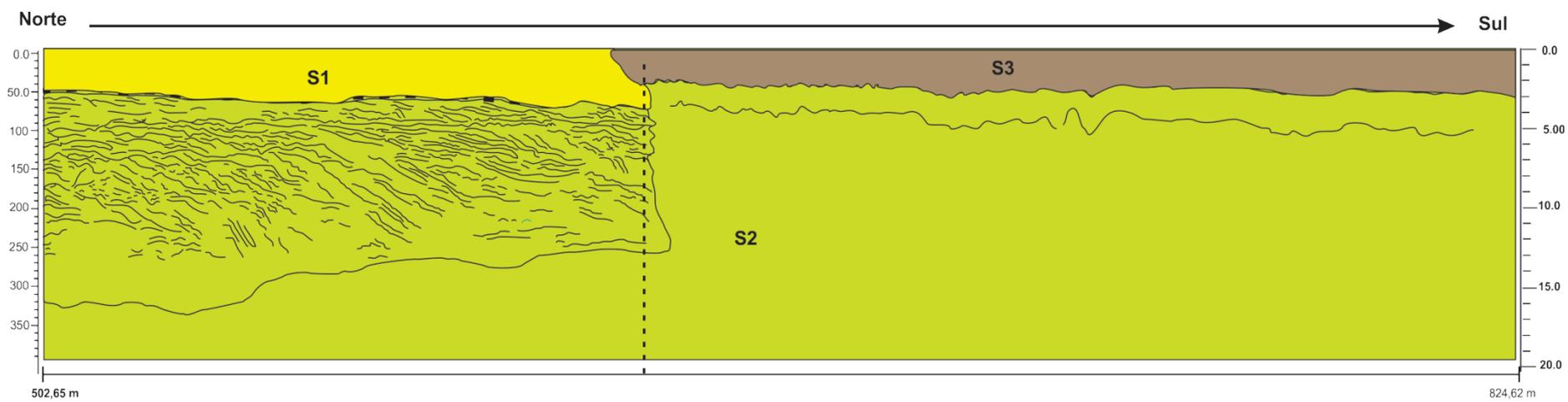


Figure 5

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A condutividade σ , ou o seu inverso, a resistividade ρ , pode variar até 20 ordens de magnitude para os materiais geológicos próximos a superfície. Os fatores que impactam diretamente nesta variação são: o teor de umidade, a porosidade, a salinidade, a proporção da fração argila e a presença de minerais condutivos;

Na área de estudo devido a grande distância da atual linha de costa, não existe a possibilidade de interferência relacionada ao sal. Assim, a existência da camada guia de onda, está associada ao tipo de ambiente lagunar, a fração de argila existente e a matéria orgânica misturada a um teor elevado de umidade, contribuem para um alto valor de condutividade, resultando numa forte atenuação do sinal e aprisionamento da onda eletromagnética.

Os resultados deste trabalho comprovaram a eficiência do método de GPR para áreas com baixo teor de argila, baixo teor de matéria orgânica e baixo teor de umidade que resultam respectivamente em uma alta resistividade elétrica e baixa condutividade, assim como sua ineficiência em locais de mistura de solos arenosos e/ou argilosos saturados com matéria orgânica.

Através de uma análise física se constatou que as equações não possuem a capacidade de fornecer as características físicas da área de subsuperfície, por isso se faz necessário associá-las às relações constitutivas para que suas propriedades físicas traduzam a interação entre os campos eletromagnéticos de uma fonte com a litologia através de propriedades físicas dos materiais logo, pode-se dizer que as propriedades eletromagnéticas dependem da composição e umidade desses materiais, ambos controlando a velocidade de propagação das ondas EM e sua atenuação.

ANEXO

24/01/2018

Email – camila.trindade.lopes@hotmail.com

Brazilian Journal of Geology - Manuscript ID BJGEO-2018-0011

Tatiana Alonso <onbehalf@manuscriptcentral.com>

ter 23/01/2018 20:10

Para: camila.trindade.lopes@hotmail.com <camila.trindade.lopes@hotmail.com>;

Cc: camila.trindade.lopes@hotmail.com <camila.trindade.lopes@hotmail.com>; eduardo.barboza@ufrgs.br <eduardo.barboza@ufrgs.br>; viniciusoliveira@unipampa.edu.br <viniciusoliveira@unipampa.edu.br>; israelirodrigo@yahoo.com.br <israelirodrigo@yahoo.com.br>;

23-Jan-2018

Dear Miss Lopes:

Your manuscript entitled "Ground Penetrating Radar - GPR signal attenuation in sands of Taim marshes, southernmost Brazil" has been received by the Editorial Office of the Brazilian Journal of Geology.

Please note that this message is not a confirmation of submission, which will only be given once your manuscript is considered to be within the scope and of interest to the journal.

Your manuscript ID is BJGEO-2018-0011.

Please mention the above manuscript ID in all future correspondence or when calling the office for questions. If there are any changes in your street address or e-mail address, please log in to ScholarOne Manuscripts at https://mc04.manuscriptcentral.com/bjgeo-s_cielo and edit your user information as appropriate.

You can also view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging in to

https://mc04.manuscriptcentral.com/bjgeo-s_cielo.

Thank you for submitting your manuscript to the

Brazilian Journal of Geology. Sincerely,
Brazilian Journal of Geology Editorial Office

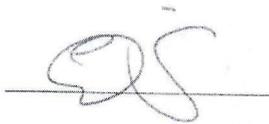
ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
“POSSÍVEIS CAUSAS DE ATENUAÇÃO DO SINAL DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO - GPR NA REGIÃO NORTE DO BANHADO DO TAIM, EXTREMO SUL DO BRASIL”
Área de Concentração: GEOLOGIA MARINHA
Autor: CAMILA TRINDADE LOPES
Orientador: EDUARDO GUIMARÃES BARBOZA
Examinador: EVERTON FRIGO
Data: 14/02/2018
Conceito: B
PARECER:
<p>O trabalho fornece uma importante contribuição para as análises de resultados de GPR de zonas costeiras. O artigo submetido, relacionado a dissertação e incorporado a mesma, apresenta uma adequada descrição dos resultados obtidos assim como de suas interpretações. Para que o trabalho fosse avaliado com nota máxima, alguns pontos poderiam ter sido melhor apresentados. Destaco alguns destes pontos a seguir:</p> <ol style="list-style-type: none">1) O texto do resumo não apresenta a fluência adequada.2) São utilizadas duas formas distintas de apresentação das citações. Algumas vezes o nome dos autores está apresentado com a primeira letra maiúscula e as demais minúsculas. Em outras partes do texto os nomes dos autores estão apresentados com todas as letras maiúsculas. Esta situação pode ser verificada, por exemplo, no segundo parágrafo da página 8.3) Na Figura 4, seria interessante apresentar uma fotografia do equipamento utilizado no levantamento em que foram obtidos os dados analisados no trabalho.4) Na descrição das técnicas de aquisição com o GPR, página 26, poderiam ser utilizadas imagens ilustrativas para facilitar o entendimento dos leitores, especialmente aqueles não familiarizados com o método.5) No lado esquerdo da equação 1.31, página 28, o “N” da frequência de Nyquist dever estar apresentado “subscrito”.

6) Na legenda da Figura 5, página 28, deve constar "Adaptado de Reynolds (1997)", uma vez que a figura é uma versão com os textos traduzidos a partir da original.

7) Deve-se evitar termos não adequados a textos científicos como "dado muito bom", apresentado no primeiro parágrafo da página 32.

8) No artigo submetido, acredito que a apresentação das equações de Maxwell não seja necessária para o entendimento dos resultados do trabalho. Equações que descrevem a atenuação das ondas eletromagnéticas com a profundidade e equações que relacionam as variações das propriedades do meio com a propagação das ondas eletromagnéticas são as mais importantes para a interpretação dos resultados.

Assinatura:



Data: 14/02/2018

Ciente do Orientador:

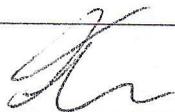
Ciente do Aluno:

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
“POSSÍVEIS CAUSAS DE ATENUAÇÃO DO SINAL DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO - GPR NA REGIÃO NORTE DO BANHADO DO TAIM, EXTREMO SUL DO BRASIL”
Área de Concentração: GEOLOGIA MARINHA
Autor: CAMILA TRINDADE LOPES
Orientador: EDUARDO GUIMARÃES BARBOZA
Examinador: FELIPE CARON
Data: 15/02/2018
Conceito: B (BOM)
PARECER:
<p>A Dissertação de Mestrado aqui avaliada apresenta uma contribuição quanto aos aspectos de atenuação de sinal de GPR em sistemas deposicionais costeiros, e mais especificamente em sistemas laguna barreira do litoral sul do Rio Grande do Sul. A avaliação da presente dissertação foi feita com base em dois aspectos: o da forma e o de conteúdo;</p> <p>*Quanto a forma, a Dissertação se encontra dentro das normas do PPGGEO-UFRGS e conta com três Capítulos, I, II e III, na qual tanto no sumário quanto no texto, estão com problemas de repetição de itens: duas vezes o item 1.3 (Contexto Geológico e Método GPR) portanto o segundo, seria 1.4. O item 1.4 (Referências) seria 1.5. O Capítulo I conta com: Introdução; Localização e Aspectos Gerais da Área de Estudos; Contexto Geológico (contendo um subitem); Método GPR (contendo sete subitens) e Referências. Como sugestão seria inserir um item para Objetivos (gerais e específicos) e outro para Justificativa. A figura 1 poderia apresentar melhor resolução. Este capítulo de modo geral apresenta-se estruturado, com problemas de inversão da ordem de conteúdos, contando com poucas ilustrações. O Capítulo II esta estruturado conforme a temática de artigo, submetido a Revista Brazilian Journal of Geology (Introduction, GPR Method, Results, Discussions, Conclusions, Acknowledgements, References) com itens subdivididos em subitens. A estrutura do artigo se apresenta de forma clara, no entanto as figuras 1 e 2 necessitam melhorar sua apresentação. As linhas da figura 2 apresentam-se serrilhadas e com baixa definição. Como sugestão as figuras 3 e 4 poderiam compor uma única figura pois o espaço permite e facilita a comparação da “seção” sem e com processamento. Nestas figuras a escala abaixo pode se apresentar na forma de números exatos (por exemplo: 0,25 km, 0,5 km). Ainda como sugestão de forma, seria a inclusão de uma lista de Figuras e uma lista de siglas, já que a dissertação trata de uma temática que apresenta muitas equações contendo siglas e unidades.</p> <p>*Quanto ao conteúdo apresentado na dissertação, de modo geral contem referências clássicas e atuais que vão de encontro ao assunto abordado. O Resumo e o Abstract devem ser revisados. Os objetivos não se apresentam explícitos na forma de um item, no entanto nos resultados e principalmente na discussão estão em consonância com que é proposto. Os resultados e discussões (a seguir no item conteúdos) ainda podem ser melhorados, mas revelam uma boa dissertação. As seguir alguns aspectos mais específicos, mas não menos importantes que considero relevantes ao trabalho quanto ao conteúdo:</p> <p>*O conteúdo relacionado Capítulo I apresenta uma breve revisão sobre a temática desenvolvida, auxiliando o leitor a compreender alguns aspectos que serão tratados no artigo, ou seja no Capítulo II. O item introdução (1.1) apresenta problemas de citações, pois em alguns parágrafos (1º, 5º e 7º) o autor não cita os autores para assuntos bem referenciados na literatura. Neste item os objetivos (gerais e específicos) e suas respectivas justificativas e problemáticas da dissertação não estão explícitos, mas sim diluídos no 3º, 6º, 7º e 8º parágrafos. Por este motivo sugeri na análise de forma, itens para objetivos bem como justificativa. No item 1.2 (Localização e aspectos gerais na área de estudos) também existem problemas relacionados a citações (2º e 3º parágrafos). O 7º e 8º parágrafos estão diretamente relacionados ao contexto geológico, portanto deveriam se encontrar no item posterior, 1.3 (Contexto Geológico). O item 1.3 (Contexto</p>

Geológico), deveria se apresentar mais completo. A área de estudos na qual foi realizado este trabalho é importante na compreensão da evolução paleogeográfica da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS). Mesmo com interpretações discutíveis e/ou contraditórias, merecem crédito por revelarem informações importantes: Delaney (1965), Soliani (1973); Soliani & Jost (1974); Jost *et al.* 1974; Pfaender *et al.* (1979), Buchmann (1996), Buchmann *et al.* (1997), Villwock, (1984); Villwock & Tomazelli (1995) entre outros. Também como sugestão, seria importante um mapa geológico geral da PCRS, pois no item 1.3.1 os sistemas deposicionais citados no texto não estão expressos no mapa (ex: como separar as unidades deposicionais: Barreira II da Barreira III? Ou Barreira III da Barreira IV?). O item 1.4, que no texto está como 1.3 (Método GPR), de modo geral se apresenta completo contendo referências clássicas, no entanto com muitos parágrafos sem citações como no item 1.4.1 (2°, 3°, 5° parágrafos). Como sugestão, o título do item 1.4.2 mais adequado seria retirar "na área de estudo", pois a revisão é generalista e não somente aplicada para a área de estudo. O conteúdo deste item está completo e com as equações mais importantes relacionadas a física do método. No item Permissividade dielétrica, que não está formalmente enumerado, o último parágrafo falta citação. O último parágrafo deste item deveria estar expresso na forma de outro item dada sua relevância, pois é parte da justificativa do trabalho, e apresentar citações. O item 1.4.3 está completo e poderia estar acompanhado de uma ilustração. O item 1.4.4 está também completo, no entanto faltam citações (1°, 2°, 3° parágrafos). O item 1.4.5 contém a descrição dos procedimentos durante a aquisição e processamento dos dados. Como sugestão seria constar um anexo com o passo a passo ilustrado para posterior consulta de pesquisadores interessados nesta temática. Outra sugestão generalista que poderia se apresentar como um item, seriam informações relativas a dados de sondagens da área de estudos. Dados físicos de subsuperfície, mesmo sendo pontuais, podem justificar passos do processamento e colaborar nas interpretações. Quanto ao conteúdo do item 2 (Corpo Principal – Artigo Submetido: Ground Penetrating Radar - GPR signal attenuation in sands of Taim marshes, southernmost Brazil.) se apresenta de modo geral, bom, com uma análise qualitativa e uma discussão de aspectos importantes relacionados a atenuação do sinal do GPR. No item 1. Introduction, se apresenta o problema, no entanto faltam citações bibliográficas ao fim de alguns parágrafos (1°, 3° e 4°) e considero que os objetivos e hipóteses não se apresentem claros, portanto necessitam revisão. A atenuação do sinal do GPR é uma temática bem expressa na bibliografia, portanto seria importante a citação de trabalhos que envolvem esta temática neste item. No item 2 contém informações importantes, mas sugiro complementos. As Figuras 1 e 2 podem ser melhoradas. A Figura 1 deve-se ajustar o contraste, brilho, e cores da imagem, e figura (menor), deve ser maior, com melhor definição e com fonte maior. Como sugestão, a Figura 2, poderia ser redesenhada para melhor definição. A legenda também pode ser melhorada, pois tem sobreposição de depósitos que não estão explicados no texto. Como a evolução geológica da região do Taim é complexa e envolve os sistemas deposicionais II, III e IV, também considero importante um mapa geológico generalista da PCRS, que poderia estar associado à Figura 2. E como a seção de GPR do trabalho é de caráter local, como sugestão, inserir uma imagem de maior detalhe que definisse os sistemas deposicionais em superfície. O item 3. poderia suprimir as equações básicas e apresentar diretamente as equações relacionadas a atenuação de sinal, que é o objeto de estudo do trabalho. O 1° parágrafo necessita de citações clássicas, pois as informações se referenciam aos trabalhos tradicionais da técnica GPR. O item 3.1 falta referências bibliográficas ao fim dos parágrafos, com exceção do último. Os itens 3.2 e 3.3 estão claros e objetivos. O item foi abordado assumindo três setores quanto aos padrões de reflexão e relacionando diretamente aos ambientes deposicionais que ocorrem na área. Por este motivo como sugestão já realizada, seriam de informações de sondagens da área, pois auxiliariam a determinar e individualizar os ambientes deposicionais. Quanto as 3 hipóteses para atenuação do sinal, considero relevantes e de boa fundamentação prático/teórica. A sugestão seria complementar com maior número de citações que abordem estas temáticas, como no caso da hipótese 3 que não está acompanhada de nenhuma referência. Para uma abordagem que expresse diretamente a análise da atenuação do sinal, poderiam ser separados traços dos setores e retirar informações na forma de valores quanto as amplitudes do sinal ao longo da profundidade. Análises de sinal são importantes para entender o espectro de energia e por consequência analisar a atenuação do sinal e suas causas. No Item 5 quando se assume valores para a permissividade e condutividade, é necessário se apoiar na literatura, por este motivo a sugestão seria a apresentação de uma tabela com valores medidos e/ou estimados para diferentes materiais, já publicados. Nota-se que para os setores 1 e 2 a discussão é breve pois os padrões de reflexão são melhor conhecidos permitindo também apoio na literatura. No

setor 1 poderia se explorar melhor a equação (1.6) citando exemplos conhecidos que explicam esta atenuação de sinal. No setor 2 os valores de condutividade elétrica e de da constante dielétrica devem se apoiar em valores conhecidos na literatura, portanto considero importante citar. Já no setor 3 como a atenuação é visível no registro, as prováveis causas (a, b, c) são expressas na forma de discussão dos parâmetros que poderiam contribuir para atenuação do sinal de modo qualitativo. Como a atenuação do sinal é um assunto de ampla abordagem, pois as causas podem ser múltiplas e peculiares caso a caso, considero que a abordagem proposta pelos autores mostrou-se direcionada e eficiente para o problema apresentado. Pelas características geológicas na área de estudos e apoiado em dados da literatura, considera-se importante que estes fatores (a, b e c) contribuem para a atenuação do sinal, mesmo que não avaliados de modo quantitativo. As conclusões são diretas e objetivas e a única sugestão seria partir de conclusões mais generalistas para as mais específicas. Contando com uma análise de dados inéditos e contribuição quanto aos aspectos de atenuação de sinal de GPR em sistemas deposicionais costeiros, o presente trabalho atinge qualidade de uma boa dissertação.

Assinatura:



Data: 15/02/2018

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
“POSSÍVEIS CAUSAS DE ATENUAÇÃO DO SINAL DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO - GPR NA REGIÃO NORTE DO BANHADO DO TAIM, EXTREMO SUL DO BRASIL”
Área de Concentração: GEOLOGIA MARINHA
Autor: CAMILA TRINDADE LOPES
Orientador: EDUARDO GUIMARÃES BARBOZA
Examinador: JAIRO FRANCISCO SAVIAN
Data: 06/02/2018
Conceito: A - Excelente
PARECER:
<p>A dissertação de mestrado apresentada pela aluna Camila Trindade Lopes tem como mérito inicial o tema central abordado, de grande relevância por abordar as possíveis causas de atenuação em dados GPR em um estudo de caso real no contexto geológico da porção sul da Planície Costeira do RS. Esta abordagem geofísica/geológica ainda é pouco abordada na literatura. Por esse motivo, o ineditismo e a complexidade do problema científico abordados no trabalho se torna uma importante contribuição.</p> <p>Sob o aspecto formal, o trabalho é bem estruturado, conforme é exigido pelas regras do PPGGEO/UFRGS. O texto da dissertação é claro e bem escrito, com exceção de algumas partes que são repetidas ao longo do texto. A autora apresenta uma boa revisão da geologia da área estudada, com exceção da descrição dos sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira, que deveria ser mais detalhado dando suas definições básicas. A autora também faz uma exposição adequada da metodologia empregada e dos resultados obtidos, principalmente na organização e numeração das equações com lógica e desenvolvimento. As ilustrações e tabelas são, em geral, adequadas e explicativas. Somente algumas falhas foram por mim observadas no texto como a ausência de algumas referências bibliográficas de autores citados no texto (<i>e.g.</i>, Sena Sobrinho, 1963; Dillemburg et al., 2000; Rosa, 2012; CPRM, 2008; Straton, 1941), os quais são importantes, mas que não comprometeram o entendimento do texto.</p>

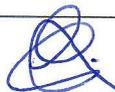
Sob o aspecto conceitual, a dissertação é igualmente bem estruturada. Os dados são apresentados, analisados e discutidos com clareza e profundidade pela aluna, incluindo as principais hipóteses que podem estar influenciando na correta interpretação dos dados. A identificação das três áreas através do radargrama da Fig. 5 do artigo e seu modelo esquemático, assim como a interpretação geológica e dos fatores que impactam diretamente nas análises, são pontos altos do trabalho. Esta análise se torna complicada, principalmente, pela falta de dados diretos de teor de humidade, porosidade, salinidade, fração argila, e da presença de minerais condutivos, tendo assim que adotar dados da literatura que nem sempre condizem com a realidade da área de estudo. Neste trabalho, especificamente, mostrou-se a eficiência do método principalmente pelos baixos teores de argila, matéria orgânica e humidade. Estas conclusões serão importantes para balizar trabalhos futuros. A submissão de um artigo para uma revista de nível internacional indexada é igualmente um ponto positivo da dissertação.

Afora os pequenos detalhes citados acima, o trabalho preenche plenamente os requisitos de uma dissertação de mestrado de muito boa qualidade. Por estes motivos, e de acordo com os critérios do Programa de Pós-Graduação (PPGGEO/UFRGS), atribuo à dissertação o conceito "A – Excelente".

Parabenizo a autora e o orientador pelo excelente trabalho realizado.

Assinatura:  Data: 06/02/2018

Ciente do Orientador:



Ciente do Aluno: