

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA  
CAMPUS CAÇAPAVA DO SUL  
CURSO DE GEOFISICA

**DAIANNE SANTOS MANGABEIRA**

**PROCESSAMENTO DE DADOS DE GPR EM BARRAS FLUVIAIS DO RIO  
CAMAQUÃ, E SUA INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO DE IMAGEM**

CAÇAPAVA DO SUL  
2016

**DAIANNE SANTOS MANGABEIRA**

**PROCESSAMENTO DE DADOS DE GPR EM BARRAS FLUVIAIS DO RIO  
CAMAQUÃ, E SUA INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO DE IMAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Geofísica da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Caron

CAÇAPAVA DO SUL  
2016

**DAIANNE SANTOS MANGABEIRA**

**PROCESSAMENTO DE DADOS DE GPR EM BARRAS FLUVIAIS DO RIO  
CAMAQUÃ, E SUA INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO DE IMAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Geofísica da  
Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título  
de Bacharel em Geofísica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 24 de novembro  
de 2016

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Felipe Caron  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Renato Pereira Lopes  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Maximilian Fries  
UNIPAMPA

## RESUMO

Durante as últimas décadas, o GPR tem sido um método geofísico importante para auxiliar estudos sedimentológicos, a fim de se reconstruir os ambientes deposicionais do passado e a natureza dos processos sedimentares em uma variedade de ambientes. Com adequada aquisição e processamento dados, tendo em vista a peculiaridade de cada problema, é possível obter-se um imageamento coerente, tornando mais facilitada a compreensão da geometria deposicional de barras fluviais. Este trabalho teve por objetivo implementar uma rotina de processamento de dados de GPR em uma barra fluvial do Rio Camaquã a fim de se obter um melhoramento de imagens contribuindo assim para uma melhoria na interpretação. Para tal procedimento utilizou-se dados coletados na localidade do Passo do Caçõ as margens do Rio Camaquã divisa natural entre os municípios de Bagé e Caçapava do Sul Para as etapas de processamento dos dados de radar foram utilizados os *sotwares* Reflex® e Prism®. Os resultados da rotina de processamento implementada para as linhas de radar mostraram uma substancial melhora na visualização dos dados de reflexão, bem como também permitiram a interpretação das principais feições e geometrias deposicionais de subsuperfície. A partir do reconhecimento e interpretação das linhas, foi-se possível caracterizar cinco radarfácies para as linhas: cliniformas, subparalelas, caóticas de preenchimento de canal, alto ângulo de preenchimento vertical e hipérboles.

Palavras-Chave: GPR, Processamento de dados, Passo do Caçõ, Radarfácies.

## ABSTRACT

During the last decades GPR has been an important geophysical method to assist sedimentological studies in order to reconstruct the depositional environments of the past and the nature of the sedimentary processes in a variety of environments. With adequate data acquisition and processing, in view of the peculiarity of each problem, it is possible to obtain a coherent image, making easier the understanding of the depositional geometry of fluvial rods. This work aimed to implement a GPR data processing routine in a river bar of the Camaquã River in order to obtain an improvement of the images, thus contributing to an improvement in interpretation. For this procedure was used data collected in the locality of Passo do Cação the banks of the Camaquã River natural border between the municipalities of Bagé and Caçapava do Sul For the processing steps of the radar data, the Reflex® and Prism® sotwares were used. The results of the processing routine implemented for the radar lines showed a substantial improvement in the reflection data visualization as well as the interpretation of the main subsurface depositional features and geometries. From the recognition and interpretation of the lines, it was possible to characterize five radarfacies for the lines: clinofoms, subparalelas, chaotic channel filling, high vertical fill angle and hyperboles.

Key words: GPR, Data processing, Passo do Cação, Radarfácies.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGAS

GPR - Ground Penetrating Radar

EM – Eletromagnética

$\vec{E}$  – Vetor de intensidade de campo elétrico

$\vec{H}$  – Vetor de intensidade de campo magnético

$\vec{D}$  – Vetor de intensidade de fluxo elétrico

$\vec{B}$  – Vetor de intensidade de fluxo magnético

$\sigma$  – Condutividade elétrica

$\epsilon$  – Permissividade dielétrica

$\mu$  – Permeabilidade magnética dos materiais

$J_c$  – Corrente de condução

$\lambda$  – Comprimento de onda

WARR – Wide Angle Reflection and Refraction

CMP – Common Mid Point

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. Em (A) é mostrado o mapa do Brasil; em (B) a área de localização no contexto do estado do Rio Grande do Sul; em (C) a área de estudo em (D) a área de estudo em detalhe. ....	4
Figura 2 -Relação entre os vetores ortogonais $\mathbf{E}$ e $\mathbf{k}$ . ....	11
Figura 3 - Ambientes com baixas perdas, os campos EMs se propagam com uma velocidade finita e com decaimento de amplitude com mínima alteração na forma do pulso. ....	12
Figura 4 - Diagrama Simplificado de um sistema GPR. ....	13
Figura 5 - Ilustração da Unidade Central do GPR. ....	14
Figura 6 - Barra Fluvial, na localidade Passo do Caçõo as margens do Rio Camaquã, divisa natural entre os municípios de Bagé e Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. Ao cento da barra, as linhas de GPR utilizadas neste trabalho. ....	22
Figura 7 - Fluxograma das etapas de processamento dos dados que foram empregadas para as linhas de radar F, H e J. ....	24
Figura 8 - Em (A) se é mostrado o radargrama dos dados brutos, e em (B) o radargrama após a aplicação do filtro <i>background removal</i> da linha F, respectivamente. ....	26
Figura 9 - Em (A) se é mostrado o radargrama dos dados brutos, e em (B) o radargrama após a aplicação do filtro <i>background removal</i> da linha H, respectivamente ....	27
Figura 10 - Em (A) se é mostrado a frequência de corte para a linha F; em (B) a frequência de corte para a linha H, e (C) a frequência de corte para a linha J. ....	28
Figura 11 - Em (A) se é mostrado o radargrama dos dados brutos, e em (B) o radargrama após a aplicação do filtro <i>background removal</i> da linha J, respectivamente ....	29
Figura 12 - Em (A) se é mostrado o radargrama dos dados brutos, e em (B) o radargrama após a aplicação do filtro <i>background removal</i> da linha J, respectivamente ....	30
Figura 13 - Radargramas mostrando os valores aplicados para os ganhos exponenciais e corte dos traços para as linhas F (A), H (B) e J(C ), respectivamente. ....	33
Figura 14 - Radargrama mostrando a localização das radarfácies 2 e 3 interpretadas para a Linha F. ....	34
Figura 15 - Radargrama mostrando a localização das radarfácies 2 e 3 interpretadas para a Linha H. ....	35
Figura 16 - Radargrama mostrando a localização das radarfácies 1,2, 3, 4 e 5 interpretadas para a Linha J. ....	36

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO .....</b>	<b>2</b>
2.1 GERAL .....	2
2.2 ESPECÍFICOS .....	2
<b>3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>3</b>
<b>4 ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>3</b>
<b>5 DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DA AREA DE ESTUDO .....</b>	<b>5</b>
<b>6. Aspectos Geomorfológicos.....</b>	<b>5</b>
<i>RIOS ENTRELACADOS</i> .....	5
<b>7 REVISÃO TEÓRICA DO GPR .....</b>	<b>6</b>
7.1 NATUREZA ONDULATÓRIA DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS .....	10
7.2 SISTEMA GPR E AQUISIÇÃO DE DADOS.....	12
7.2.1 Antenas .....	13
7.2.2 Resolução .....	14
7.3 METODOLOGIA DO LEVANTAMENTO .....	15
7.3.1 Técnicas de aquisição de dados.....	15
7.4.1 Edição dos dados .....	18
7.4.3 Filtro Dewow.....	19
7.4.4 Correções do tempo zero.....	19
7.4.5 Filtragem .....	19
7.4.6 Correções Topográfica .....	20
7.4.6 Conversão tempo-profundidade.....	21
<b>8. MATERIAS E METODOS .....</b>	<b>21</b>
8.1 COLEÇÃO DE DADOS .....	21
8.2 SELEÇÃO DE DADOS .....	21
8.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	23
<b>9. RESULTADOS E DISCUSSOES.....</b>	<b>25</b>
<b>10. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>37</b>
<b>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Radar de penetração em solo, GPR (*Ground Penetrating Radar*), é um método geofísico de superfície que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência entre 10 e 2500 MHz para mapear feições geológicas rasas da subsuperfície ou localizar objetos enterrados pelo homem. Este método assemelha-se ao método de reflexão sísmica e ao sonar, no princípio físico e na metodologia do levantamento de campo, com a exceção de que é baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas (PORSANI,1999). Os sinais são enviados ao solo e, ao encontrarem diferenças de propriedades elétricas nos materiais, uma parte da energia enviada é refletida de volta à superfície. Os sinais refletidos são captados por uma antena receptora e registrados em um radargrama em um computador portátil. Neste radargrama é representada a amplitude do sinal em função do tempo de reflexão (tempo de ida e volta do sinal), (KEAREY. *et al*, 2009)

A frequência de operação das antenas varia de um equipamento para outro e de acordo com o objetivo da investigação. Durante as últimas décadas, o GPR tem sido um método geofísico importante para auxiliar estudos sedimentológicos, a fim de se reconstruir os ambientes deposicionais do passado e a natureza dos processos sedimentares em uma variedade de ambientes. Com adequada aquisição e processamento dados, tendo em vista a peculiaridade de cada problema, é possível obter um imageamento coerente, tornando mais facilitada a compreensão da geometria deposicional de barras fluviais (e.g. NEAL, 2004).

A compreensão da geometria deposicional de barras fluviais, tem sido auxiliada com registros de Georadar por diversos pesquisadores. BEST, (2003) demonstrou que a utilização de antenas de georadar de 200 e 400 Mhz podem auxiliar na identificação de processos formadores em distintos pacotes de sedimentação de barras fluviais entrelaçadas e oferece como produto final o modelo deposicional de toda a barra.

O trabalho de Neal (2004) aponta outras pesquisas sedimentológicas com a utilização do Georadar apresentando estudos no ambiente fluvial, como por exemplo Bridge et al. (1995, 1998) e Bristow et al. (1999, 2000) que descrevem observações detalhadas de depósitos arenosos ao sul do rio Esk na Escócia utilizando GPR. Parker et al. (2013), utilizou modelos digitais de elevação somados a dados de Georadar para quantificar a relação entre morfodinâmica fluvial e o produto geométrico e sedimentológico em subsuperfície, em um monitoramento de escala temporal de quatro anos.

O presente trabalho tem como propósito apresentar rotinas, de processamento de dados de GPR em barras fluviais do rio Camaquã, visando contribuir com o melhoramento no procedimento de análise e interpretação de dados de radar.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 GERAL**

O principal objetivo deste trabalho é testar e aprimorar sequências de processamento de dados de GPR em barras fluviais do rio Camaquã, afim de melhoramento da imagem para interpretações.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

Testar parâmetros para cada tipo de processamento ao banco de dados coletados.

Implementar sequências de processamento tradicionais e específicas ao banco de dados.

Identificar e qualificar os melhoramentos obtidos nas imagens em relação aos parâmetros e sequências utilizadas.

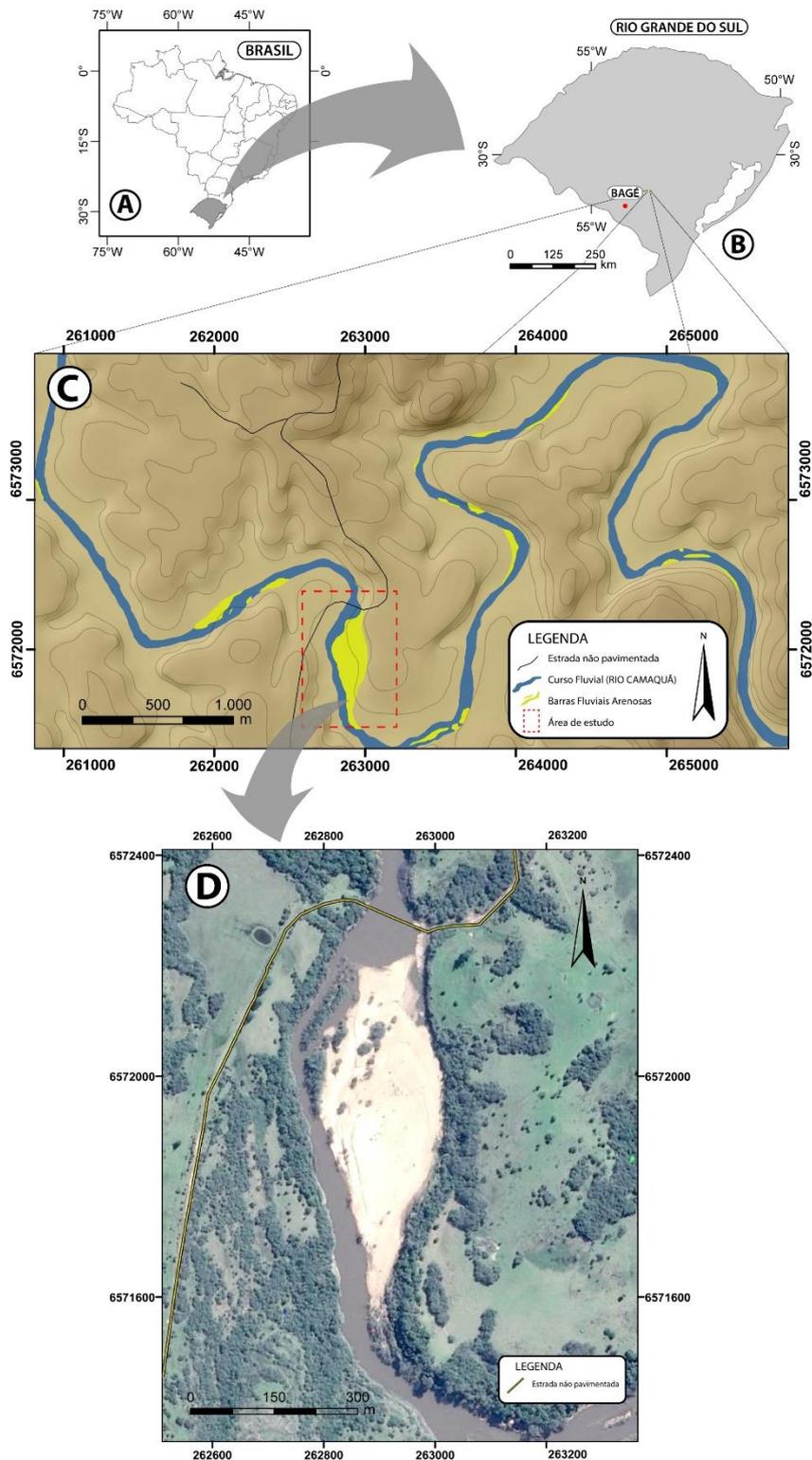
### **3 JUSTIFICATIVA**

Uma grande variedade de estudos modernos (e.g. NEAL, 2004) tem demonstrado a aplicabilidade versátil do GPR na investigação de sistemas deposicionais quaternários. Deste modo, o presente trabalho justifica-se por contribuir, especificamente, com o estudo de sistemas fluviais modernos a partir da implementação de uma rotina sistemática de processamento de dados de GPR, que envolve fundamentalmente: a) a edição dos dados; b) o processamento do sinal; e c) a apresentação da imagem processada.

### **4 ÁREA DE ESTUDO**

A área onde foram coletados os dados encontra-se ao Sul, do município de Bagé, tendo como principal acesso a BR-153 sentido Caçapava do Sul – Bagé. Chegando na ponte sobre o Rio Camaquã toma-se o primeiro acesso a esquerda por uma estrada não pavimentada até se chegar a uma localidade de denominação Passo do Caçõ, uma extensa barra fluvial utilizada como espaço de lazer pela população local (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. Em (A) é mostrado o mapa do Brasil; em (B) a área de localização no contexto do estado do Rio Grande do Sul; em (C) a área de estudo em detalhe; e em (D) a área de estudo em detalhe.



Fonte: Dados geográficos oriundos da Carta do Brasil ao Milionésimo (<http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Geologia-Basica/Carta-Geologica-do-Brasil-ao-Milionesimo-298.html>).

## 5 DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DA AREA DE ESTUDO

Sistemas fluviais variam significativamente as suas características no tempo e no espaço. Fatores como relevo e a descarga controlam a capacidade e competência dos rios, refletindo, principalmente, no tipo de sedimentos transportados e na morfologia do canal (SILVA, *et al* 2008).

Depósitos aluvionares quaternários associados as margens do Rio Camaquã, são constituídos de sedimentos inconsolidados nos tamanhos de areia a seixos, mal selecionados, encontrados na forma de barras fluviais entrelaçadas, de meio do canal ou estendidas lateralmente.

## 6. Aspectos Geomorfológicos

Rios possuem uma série de formas de canais devido ao seu trato deposicional. Canais fluviais podem ser classificados com base na hidrogeometria, tamanho de grãos ou padrão do canal. No presente projeto será definida a forma de canal de rio presente na área do estudo, sendo assim de rio entrelaçados.

### *RIOS ENTRELAÇADOS*

Os rios entrelaçados têm como característica uma alta variabilidade de descarga do fluxo ao longo do ano e um alto suprimento sedimentar, sendo formados preferencialmente em contextos de declive maior. Uma grande quantidade de sedimentos é transportada durante os períodos de alta descarga, que acabam por ser depositados no canal fluvial na forma de barras e ilhas durante os períodos de diminuição da velocidade do fluxo. Essas barras e ilhas produzem o deslocamento e bifurcação do fluxo, gerando uma rede de canais secundários dentro do canal principal (BRIDGE, 1993).

Uma feição dominante desse sistema é a presença de várias hierarquias de formas de leito, incluindo marcas onduladas e dunas de diferentes morfologias coexistentes dentro do canal. É bastante comum a presença de barras de meio

de canal com formas de leito menores (dunas e marcas onduladas) migrando ao longo do seu dorso e face frontal (BRISTOW,1987). Segundo Silva, *et al.* 2008, a variação na hierarquia das formas de leito é resultante das frequentes mudanças na descarga do fluxo e profundidade da lâmina d'água.

## 7 REVISÃO TEÓRICA DO GPR

A fundamentação do GPR (Radar de Penetração no Solo) está associada a teoria eletromagnética (EM), desta forma, compreender estes conceitos é essencial para se trabalhar com a técnica. A propagação de ondas eletromagnéticas é regida pelas *equações de Maxwell* que descrevem matematicamente a física dos campos EMs, e as *relações constitutivas* que quantificam as propriedades dos materiais. A combinação dessas duas fornece a base para se trabalhar com os sinais de GPR.

As *equações de Maxwell* são definidas em termos dos vetores de intensidade de campo elétrico (**E**) e magnético (**H**) e dos vetores de intensidade de fluxo elétrico (**D**) e magnético (**B**). Em uma situação onde não existem cargas livres no meio as equações de Maxwell são dadas em sua forma diferencial no domínio do tempo pelo conjunto de equações (GRIFFITHS, 1999).

$$\text{Lei da Indução de Faraday} \quad \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.0)$$

$$\text{Lei de Ampere-Maxwell} \quad \nabla \times \mathbf{H} = - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (1.1)$$

$$\text{Lei de Gauss da eletrostática} \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (1.2)$$

$$\text{Lei de Gauss da magnetostática} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.3)$$

Onde (**E**) é o vetor intensidade de campo elétrico (V/m), (**B**) é o vetor densidade de fluxo magnético (Wb/m<sup>2</sup> ou T), (**H**) é o vetor intensidade de campo magnético (A/m), (**J**) é o vetor densidade de corrente elétrica (A/m<sup>2</sup>), (**D**) é o vetor densidade de fluxo elétrico (C/m<sup>2</sup>).

A Lei da indução de Faraday (1.0) apresenta um fluxo magnético variável no tempo em uma região do espaço gera um campo elétrico induzido. A lei de Ampère-Maxwell (1.1), mostra que as correntes elétricas e o fluxo elétrico variável no tempo em uma região do espaço produzem um campo magnético induzido. A Lei de Gauss da eletrostática (1.2) diz que o fluxo elétrico pode ser gerado por cargas elétricas, as quais podem ser encontradas na natureza na forma de monopólios elétricos. O mesmo não ocorre segundo a Lei de Gauss da magnetostática (1.3), à exceção de que as cargas magnéticas são apenas um artifício matemático que garante a simetria das equações e não existem na natureza.

Estas quatro equações podem também ser escritas no domínio da frequência para expressar seu comportamento harmônico no tempo, o que é conveniente para os estudos com o método GPR. Para isto faz-se a transformada de Fourier das equações (1.0) a (1.3), que ficam da seguinte forma (BALANIS, 1989):

$$\text{Lei da Indução de Faraday} \quad \nabla \cdot E = -iwB \quad (1.4)$$

$$\text{Lei de Ampere-Maxwell} \quad \nabla \times H = J + iwD \quad (1.5)$$

$$\text{Lei de Gauss da eletrostática} \quad \nabla \cdot D = 0 \quad (1.6)$$

$$\text{Lei de Gauss da magnetostática} \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (1.7)$$

As vantagens de se trabalhar neste domínio são a não dependência do tempo e a substituição da derivada parcial temporal por um produto.

As *relações constitutivas* do meio descrevem os efeitos de condutividade elétrica ( $\sigma$ ), permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ) e permeabilidade magnética dos materiais ( $\mu$ ). A velocidade de propagação e a atenuação do sinal são os fatores mais importantes que governam a propagação da onda EM em um determinado meio.

Segundo (JOL, 2009) as relações constitutivas do meio são grandezas tensoriais que permitem relacionar as componentes elétrica (E) e magnética (H) do campo eletromagnético às densidades de fluxo elétrico (D), de fluxo magnético (B) e de corrente de condução ( $J_c$ ). Elas representam as

características físicas do meio, fornecendo uma descrição macroscópica do comportamento dos elétrons, átomos e moléculas se comportam mediante a aplicação de um campo eletromagnético, sendo dadas pelas equações (1.8) a (1.10):

$$D = \varepsilon E \quad (1.8)$$

$$B = \mu H \quad (1.9)$$

$$J = \sigma E \quad (1.10)$$

Onde  $\varepsilon$  é a permissividade dielétrica (F/m),  $\mu$  é a permeabilidade magnética (H/m) e  $\sigma$  é a condutividade elétrica (S/m).

Mediante a aplicação de um campo elétrico a permissividade dielétrica quantifica a capacidade de polarização de um material, no vácuo, esta grandeza assume o valor constante  $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m. A permeabilidade magnética quantifica a predisposição de um meio em ser magnetizado quando submetido a um campo magnético, assumindo o valor constante  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m no vácuo. A condutividade elétrica quantifica as cargas elétricas em movimento na presença de um campo elétrico, i. e., a capacidade que um material tem de conduzir corrente elétrica, sendo a relação expressa na equação (1.10) denominada Lei de Ohm.

No método GPR, expressa-se as propriedades de um material geológico por meio de sua permissividade dielétrica relativa ou constante dielétrica ( $\varepsilon_r$ ). Esta constante é a razão entre a permissividade dielétrica do material ( $\varepsilon$ ) e a permissividade dielétrica do vácuo ( $\varepsilon_0$ ), ou seja:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1.11)$$

Embora também exista o conceito de permeabilidade magnética relativa, dado por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.12)$$

A permeabilidade magnética é considerada de valor constante e igual ao da permeabilidade magnética do vácuo para a maioria dos materiais geológicos (ANNAN, 2003).

O radar de penetração no solo é mais útil em materiais com baixas perdas elétricas, sendo assim supondo que a condutividade elétrica seja igual a zero, o GPR teria eficiência máxima, uma vez que os sinais penetrariam em profundidades maiores. Porém, na prática, condições de baixa perdas elétricas não são predominantes. Ambientes argilosos ou áreas de água subterrânea salina criam condições onde a penetração do sinal de GPR é extremamente limitada. (JOL, 2009)

Levando em conta que a terra é composta de muitos materiais, a água e o gelo representam poucos casos em que um único componente está presente. A nível de informação, a areia da praia é uma mistura de grãos de solo (tipicamente 60-80% do volume), ar, água e íons dissolvidos em água. Desta maneira, a compreensão das propriedades físicas das misturas é um fator essencial para a interpretação de uma resposta do GPR. (JOL, 2009)

Na faixa de frequência mais utilizada pelo GPR (10-1000MHz), o que vai ditar o comportamento geral das respostas será a presença ou a ausência de água, por tanto seguem algumas considerações importantes:

- Minerais soltos e agregados em misturas geralmente são bons dielétricos. Eles têm tipicamente uma permissividade na faixa de 3-8 (dependendo da mineralogia e compactação) e são normalmente isolantes com condutividade virtualmente igual a zero.
- Solos, rochas e materiais de construção têm espaço vazio entre os grãos (poros) disponíveis para serem preenchidos com ar, água ou outro material.
- A água é o material de ocorrência natural mais polarizável, isto é, possui alta permissividade  $k \approx 80$ .
- A água nos espaços porosos normalmente contém íons, e a condutividade elétrica associada à mobilidade desses íons é muitas vezes o fator dominante na determinação da condutividade elétrica dos

materiais. Como resultado, solos e rochas apresentam condutividades tipicamente na faixa de 1-1000 mS/m .

- Como a água é invariavelmente presente nos poros dos materiais de ocorrência natural, exceto em situações únicas onde algum mecanismo assegura a total ausência de água, ela tem um efeito dominante sobre as propriedades elétricas.

Relações de Topp (TOPP et al., 1980) e variação da Lei de Archie (ARCHIE, 1942) demonstra a relação entre permissividade, condutividade elétrica e teor volumétrico de água para o solo.

## 7.1 NATUREZA ONDULATÓRIA DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

O GPR explora o caráter ondulatória dos campos eletromagnéticos. As *equações de Maxwell* descrevem os campos elétrico e magnético quando esses campos variam com o tempo. Conforme a magnitude relativa entre a quantidade de energia perdida (associada a condutividade) com a quantidade armazenada (associada à permissividade e à permeabilidade), os campos podem espalhar-se ou propagar-se como ondas. Se usa o GPR quando há condições de propagação ondulatória dos campos EMs. (ALMEIDA, 2015):

Para tornar-se mais evidente o caráter ondulatório, é necessário reescrever as equações de Maxwell para eliminar ou o campo elétrico ou o campo magnético. Fazendo o uso do campo elétrico ( $\bar{E}$ ) se tem a reconfiguração da equação vetorial transversa da onda:

$$\nabla_x \nabla_x \bar{E} + \mu\sigma \cdot \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu\epsilon \cdot \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.0)$$

As soluções da equação transversa da onda são denominadas de soluções de ondas planas das equações de Maxwell. Essas soluções assumem a seguinte forma:

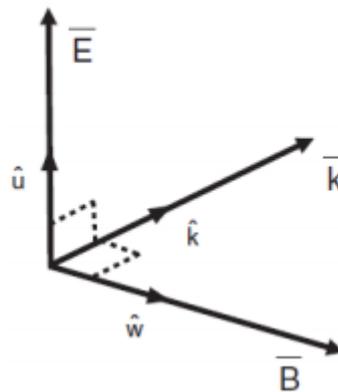
$$\bar{E} = f(\bar{r}, \bar{k}, t)\hat{u} \quad (2.1)$$

onde o  $\bar{r}$  é o vetor que descreve a posição espacial e  $f(\bar{r}, \bar{k}, t)$  completa a equação escalar da onda

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\sigma \frac{\partial}{\partial t} f(\beta, t) - \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) = 0 \quad (2.2)$$

onde o  $\beta = \bar{r} \cdot \bar{k}$  é a distância na direção de propagação. A interação entre os vetores  $\bar{E}$  (campo elétrico),  $\bar{B}$  (campo magnético) e  $\bar{k}$  (direção de propagação do campo eletromagnético) é representada na figura 2.

Figura 2 -Relação entre os vetores ortogonais  $\bar{E}$ ,  $\bar{B}$  e  $\bar{k}$ .



Fonte: Extraído de Jol, 2009.

Fazendo  $\sigma = 0$ , a equação 2.2 se simplifica há:

$$\frac{\partial^2}{\partial \beta^2} f(\beta, t) - \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\beta, t) = 0 \quad (2.3)$$

Na qual tem a solução na forma

$$f(\beta, t) = f(\beta \pm vt) \quad (2.4)$$

Em que

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2.5)$$

É a velocidade da onda.

De outra forma, quando se há condições de baixas perdas, as resoluções da equação (2.2), assumem a seguinte forma

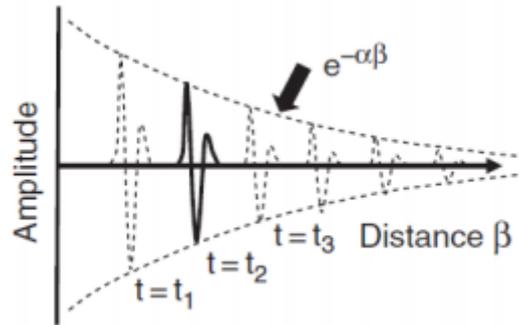
$$f(\beta, t) \approx f(\beta \pm vt)e^{\pm\alpha\beta} \quad (2.6)$$

Em que

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad \sigma = \frac{1}{2}\sigma\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.7)$$

São a velocidade e a atenuação, respectivamente.

Figura 3 - Ambientes com baixas perdas, os campos EMs se propagam com uma velocidade finita e com decaimento de amplitude com mínima alteração na forma do pulso.



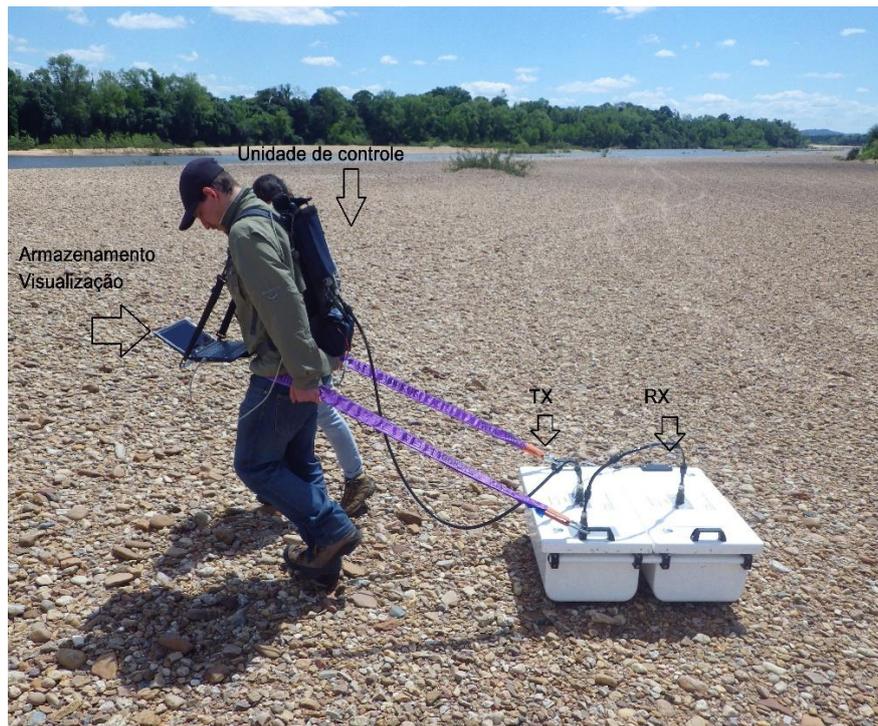
Fonte: extraído de JOL, 2009.

A natureza ondulatória é indicada pelo fato de que a distribuição espacial dos campos é transladada na direção  $\beta$  entre os tempos de observação.

## 7.2 SISTEMA GPR E AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema GPR pode ser esquematizado simplificada conforme mostrado na Figura 4. A unidade de controle é composta por um computador portátil, o qual permite a visualização e o armazenamento dos dados adquiridos. Dependendo do fabricante do equipamento esta unidade de controle pode ser um computador desenvolvido unicamente para o equipamento, ou pode ser um notebook pessoal comum. No segundo caso, o notebook pessoal é conectado a uma unidade externa que faz a interface entre o software de aquisição fornecido pelo fabricante e as antenas transmissora ( $T_x$ ) e receptora ( $R_x$ ).

Figura 4 - Diagrama de um sistema GPR.



Fonte: O Autor.

A unidade de controle envia pulsos de tensão para os elementos da antena, os quais geram sinais eletromagnéticos pulsados. Os elementos da antena são geralmente dipolares chamados de *bowtie* por serem no formato de “gravatas borboleta” (ALMEIDA, 2015).

### 7.2.1 Antenas

As antenas são parte importante do equipamento, que atuam como um tradutor eletromagnético transformando impulsos elétricos que recebem da unidade central em uma série de pulsos ou ondas eletromagnéticas de curta duração que se emitem no meio. (JOL, 2009):

Outra função adquirida a antena é captar a energia refletida e transformá-la em pulsos elétricos que envia a unidade central. Cada antena possui a característica conforme a sua frequência central e pela duração do pulso emitido: (ALMEIDA, 2015)

Figura 5 - Ilustração da Unidade Central do GPR.



Fonte: <http://www.esteio.com.br/?pagina=servicos/executados/gpr/wtorre.php>

### 7.2.2 Resolução

Resolução é nada mais do que a capacidade de se identificar separadamente duas feições distintas um conjunto de dados. Esta característica é governada pelo espectro da antena. Para duas interfaces ou dois objetos distintos possam ser identificados eles mantem uma separação espacial que depende da frequência empregada no sistema:

A separação espacial mínima ( $\Delta r$ ) para resolução vertical é dada pelo critério de Rayleigh, que estabelece esta distância mínima deve ser equivalente a  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda ( $\lambda$ ). Como o comprimento de onda é dependente da frequência, (DANIELS, 2004; JOL, 2009), tem-se que:

$$\nabla r \geq \frac{\lambda}{4} \rightarrow \nabla r \geq \frac{v}{4f} \quad (3.1)$$

A separação mínima ( $\Delta l$ ) para resolução horizontal entre dois objetos depende não só do comprimento de onda do sinal, mas também da profundidade ( $r$ ) destes objetos.

$$\nabla l \geq \sqrt{\frac{r\lambda}{2}} \rightarrow \nabla l \geq \sqrt{\frac{rv}{2f}} \quad (3.2)$$

## 7.3 METODOLOGIA DO LEVANTAMENTO

Ao se realizar a aquisição de dados de GPR deve ser realizado um planejamento, onde considera-se com atenção a profundidade do alvo, a geologia local, contraste das propriedades elétricas dos materiais, atenuação do sinal, topografia, logística e fontes de ruídos.

### 7.3.1 Técnicas de aquisição de dados

Existem 4 modos de se realizar a aquisição de dados do GPR: (1) perfil de reflexão com afastamento constante (common off-set), (2) reflexão e refração de grande abertura angular ou wide angle reflection and refraction (WARR), (3) ponto médio comum ou common mid point (CMP) e (4) transiluminação ou tomografia. Segue uma breve descrição de cada tipo:

- **Perfil de reflexão com afastamento constante (common off-set)**

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 hipérboles de difração permitem que se obtenha um modelo de velocidades baseado no número de hipérboles, nos valores de velocidades oriundos do ajuste de tais hipérboles e, finalmente, da interpolação deste valor.

- **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. Um conjunto de famílias WARR permite se obter famílias CMP e assim um campo de velocidades.

- **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.

- **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 ( $f_N$ )**

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 ( $\Delta t$ ) está relacionado à máxima frequência que se deseja registrar, denominada frequência de Nyquist ( $f_N$ ) e dada pela relação (KEAREY ET al., 2009).

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (4.1)$$

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. Para perfis de reflexão, pode-se adotar a aproximação dada pela relação:

$$t_w = 1,3 \frac{2Z}{v} \quad (4.2)$$

Onde  $t_w$  é o comprimento da janela temporal,  $z$  é a profundidade que se deseja atingir com o sinal e  $v$  é a velocidade da onda eletromagnética no meio.

Outro critério a se levar em conta sobretudo para perfis de reflexão, trata-se do intervalo entre traços adquiridos. Estes intervalos estão diretamente ligados ao objetivo do levantamento, se o objetivo é localizar pequenos alvos, como tubulação e cabeamento, o intervalo entre os traços deve ser pequeno o suficiente para que não ocorra o risco de não se adquirir dados sobre o alvo. Porém, quanto menor for o espaçamento entre os traços, mais lenta será a aquisição. Quando a aquisição é feita visando um estudo das interfaces geológicas em subsuperfície os traços podem ter um espaçamento um pouco

maior, possibilitando assim que a aquisição seja feita com velocidade maior e podendo cobrir uma área maior em menos tempo. (KEAREYET al., 2009).

## 7.4 PROCESSAMENTO DE DADOS

O processamento dos dados GPR, busca interagir com conjuntos de dados adquiridos para deixá-los visualmente aceitável e ser possível de ser interpretados. É importante salientar as peculiaridades dos dados a fim de se avaliar a necessidade ou não da aplicação de cada etapa de um fluxo básico/avançado de processamento, de maneira que se torne pelo menos consistente, eficiente e realista.

### 7.4.1 Edição dos dados

A primeira etapa do processamento é a edição dos dados, muitas vezes é a mais demorada sequência de processamento, uma vez que os dados sempre precisam de algum tipo de reorganização. Nesta etapa há remoção e ou correção de dados incorretos/pobre na qualidade do sinal e triagem dos arquivos de dados. Quando se tem uma manutenção eficaz dos dados desde o princípio do processamento há grandes chances de se ter uma boa qualidade na interpretação, especialmente se haver grandes volumes de dados.

Erros que acontecem em campo na aquisição de dados podem significar que as seções precisam ser revertidas, combinadas, unidas ou sofrer outras manipulações. Erros comuns é a gravação incorreta dos parâmetros de levantamento, que pode resultar em erros no cabeçalho dos arquivos de dados, que por sua vez irão atingir a forma com que os dados serão importados para o programa usado no processamento.

#### **7.4.2 Remoção de *background***

Este tipo de filtro calcula a média de todos os traços do radargrama e subtrai esta média de cada traço ao longo de todo o perfil. Este tipo de filtragem é indicado para remover efeitos de reverberação do sinal provocados pelo acoplamento da antena com o solo. Este tipo de ruído aparece horizontalmente de forma contínua em todo o perfil, sendo facilmente removido com este tipo de filtro.

#### **7.4.3 Filtro Dewow**

Ao se adquirir os dados é possível que componentes de baixa frequência relacionada ao campo sejam registrados juntamente com o sinal de interesse. Desta forma a energia do campo próximo pode provocar um deslocamento no traço por completo, chamado de deslocamento DC. O filtro Dewow remove essas influências de mais baixa frequência do espectro e desloca o sinal novamente para a referência na amplitude zero. (ALMEIDA, 2015)

#### **7.4.4 Correções do tempo zero**

Instabilidade eletrônica, deriva térmica, diferença nos comprimentos de cabos e variações entre as antenas e o solo pode causar saltos no tempo de chegada das primeiras ondas diretas pelo ar e pelo solo (definida como o ponto de tempo zero) (OLHOEFT, 2000), o que causa um efeito na posição da interface ar/solo na seção da sequência temporal e no grau de paridade entre os traços. Por esta razão antes de se aplicar métodos mais avançados do processamento é necessário um ajuste nos traços para todos terem a mesma posição de tempo zero.

#### **7.4.5 Filtragem**

Filtros são usados nos dados para remover ruídos produzidos pelo homem ou ruídos do sistema, eles melhoram a qualidade visual dos dados. A exemplo de remoção de ruídos devido às frequências de transmissões de rádio

ou o efeito de listas devido as vibrações das antenas (OLHOEF, 2000). Além disto, os filtros também auxiliam na extração de aspectos particulares dos dados, e, portanto, ajudam na interpretação (exemplo, enfatizando refletores plano-horizontais ou difrações). Existem vários tipos de filtros, desde filtros simples como a exemplo do passa-banda, até os filtros mais sofisticados no domínio do comprimento de onda. Os filtros simples são bons na remoção de ruídos de baixa e alta frequência, já os mais sofisticados são efetivos para problemas específicos como por exemplo, vibrações excessivas de antenas ou picos de ruídos.

De modo geral, os filtros são classificados em dois tipos básicos: temporal (atua individualmente nos traços em tempo) ou espacial (atua através de um numero de traços em distância). Esses dois filtros combinados produzem filtros 2D que operam sobre dados em tempo e espaço simultaneamente.

Há vários tipos de filtros temporais 1D, a exemplo dos passa-baixa e passa-alta, ou a combinação deles que é o passa-banda (filtros no domínio frequência). O passa alta deixa passar as frequências mais altas, ou seja, ele se torna bom para remover efeitos de deriva do sinal, o passa baixa deixa passar apenas as frequências mais baixas este é bom para remover ruídos.

Filtros passa-banda há vários tipos, cada um com características próprias que definem a forma da região que passará pelo filtro. Em prática filtros temporais são bons para remover ruídos com frequências maiores ou menores do que a largura de banda do sinal principal do GPR, estes filtros limpam os dados e melhoram a visualização da seção. Os filtros espaciais trabalham bem com dados de baixa desordem e de boa qualidade em geral tendem a ser mais eficientes na eliminação da resposta da onda direta pelo ar e pela terra e efeitos causados pela vibração das antenas.

#### **7.4.6 Correções Topográfica**

Corrigi o início do registro de cada traço de acordo com a topográfica ao longo do perfil. Vários sistemas de GPR comerciais permitem a conexão com um GPS que registra a posição e a elevação do equipamento durante a aquisição dos dados, porém o erro associado à elevação no sistema do GPS pode não apresentar uma precisão aceitável dependendo do sistema utilizado. Por tanto é

comum o uso de dados adquiridos de levantamento topográfico para esta correção (ALMEIDA, 2015).

#### **7.4.6 Conversão tempo-profundidade**

A Correção tempo-profundidade é realizada de maneira que se possa se estimar a profundidade de casa refletor ao longo do perfil. Este cálculo é feito através da atribuição de uma velocidade constante no perfil e calculando a profundidade a partir dos tempos de reflexão do sinal. (ALMEIDA, 2015)

## **8. MATERIAS E METODOS**

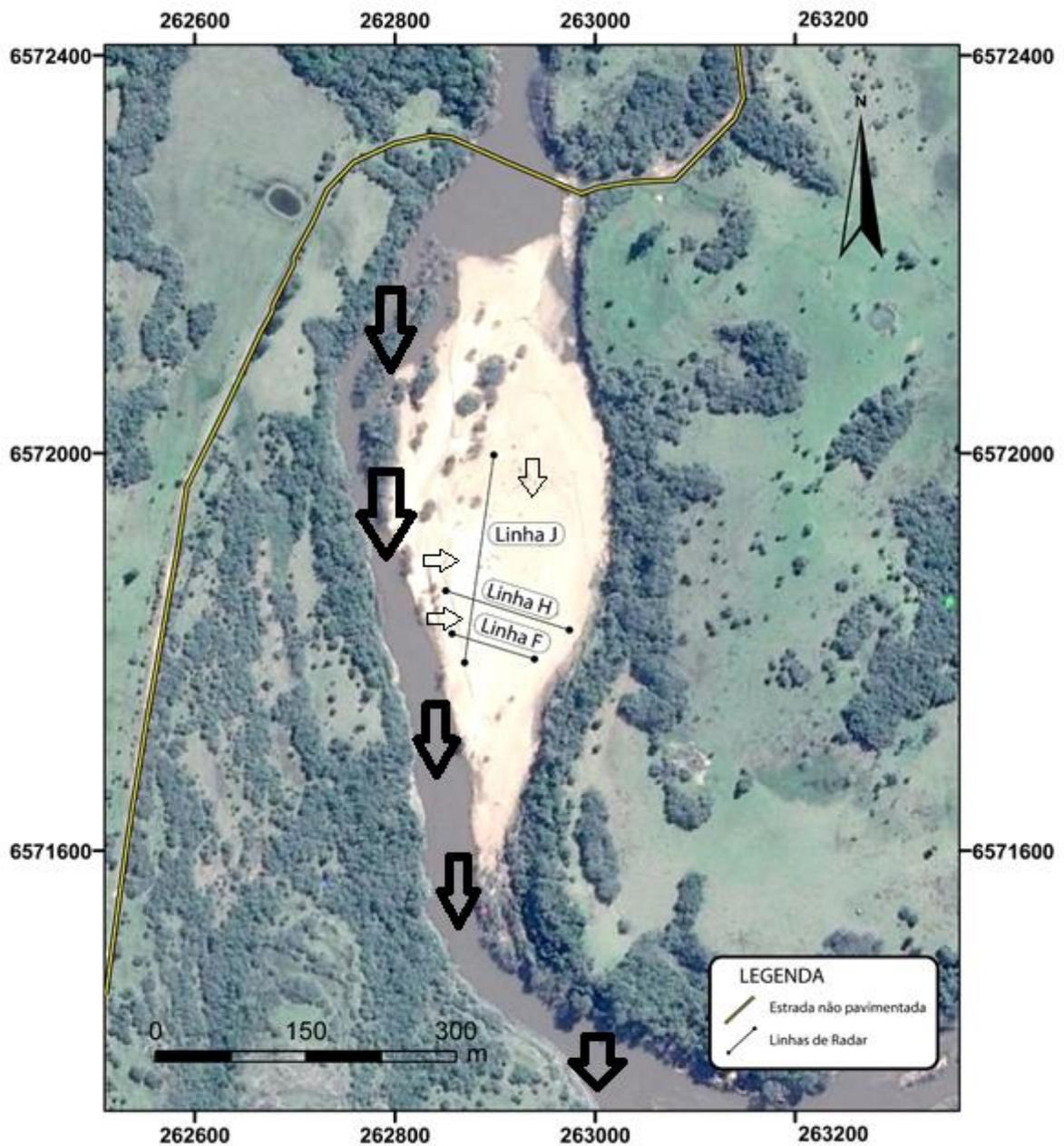
### **8.1 AQUISIÇÃO DE DADOS**

Os dados utilizados neste trabalho foram coletados com antenas IDS nas frequências de 80 MHz. A técnica de levantamento utilizada foi o common *offset*. Durante a etapa de aquisição dos dados de campo foram adquiridas 10 linhas de radar, com extensões de cerca de 50 a 200 metros de comprimento na superfície da barra fluvial.

### **8.2 SELEÇÃO DE DADOS**

Visando-se a otimização dos objetivos propostos neste trabalho, foram-se selecionadas 2 linhas em seção transversal (linhas F e H) com direção aproximada WNW-ESE e comprimentos de 112 e 125 metros, e uma linha em seção longitudinal à barra (linha J) com direção aproximada NNE-SSW e comprimento de 200 metros, respectivamente. A figura 6 abaixo mostra a disposição das linhas de GPR utilizadas.

Figura 6 - Barra Fluvial, na localidade Passo do Cação as margens do Rio Camaquã, divisa natural entre os municípios de Bagé e Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. Ao cento da barra, as linhas de GPR utilizadas neste trabalho.



Fonte: Modificado de Google Earth Pro®

### 8.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

A etapa de visualização dos dados brutos foi realizada no programa Prism2® e aplicado o ganho de tela a fim de se observar as principais reflexões detectadas a serem processadas

Na etapa seguinte foi-se utilizada os valores das constantes dielétricas (permissividade dielétrica) para os diferentes meios e substratos de acordo com o trabalho de Neal (2004), a fim de aferir a profundidade das seções de radar utilizadas. Dado que a barra fluvial em estudo é composta predominantemente por areia e cascalhos saturados em água, o valor adotado para a constante de permissividade dielétrica foi de 10 .

Em parceria com o IG-UFRGS e com o laboratório de Sismoestratigrafia, os dados foram carregados no programa Radam® onde se foi utilizado o filtro *background removal*. Como visto anteriormente no item 7.4.2, este filtro é utilizado na tentativa de minimizar os efeitos causados pelo acréscimo de ruídos ambientais durante a aquisição. Neste âmbito espera-se eliminar as frequências indesejáveis e então se obter uma melhora na visualização dos dados de radar. O número de traços foi de 200 e a janela de busca utilizada foi entre as frequências de 30 a 130 MHz. Após a realização desta etapa de processamento, foi-se possível definir com mais nitidez a visualização das reflexões, bem como também acentuar o sinal recebido em maiores profundidades.

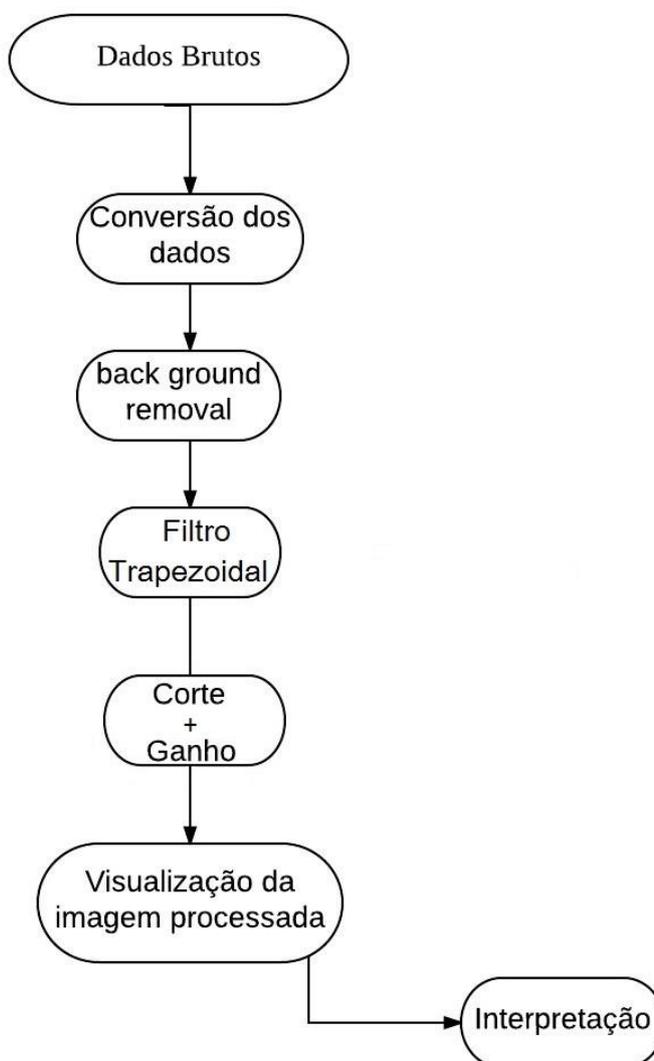
A etapa seguinte seguiu-se da aplicação do filtro passa-banda trapezoidal, objetivando-se a remoção de ruídos (frequências de TV, UHF, rádios, antenas de celulares, etc.) que ocasionalmente poderiam vir a mascarar as reflexões que poderiam estar associadas às geometrias deposicionais. Especificamente, o filtro trapezoidal possui parâmetros distintos que delimitam as frequências de corte inferior e superior da banda passante. Esta etapa é descrita individualmente para cada seção mostrando as janelas e corte, bem como os comentários de amplificação ou atenuação do sinal.

Para compensar os efeitos de atenuação do sinal do radar e dos processamentos realizados, e conseqüentemente melhorar a visualização final

das estruturas e geometrias deposicio09nais, foi-se aplicado o ganho exponencial e corte em cada uma das etapas descritas anteriormente. Esta etapa também será descrita individualmente para cada seção e mostrando os gráficos de ganho bem como os comentários.

As etapas utilizadas durante o processamento dos dados de radar estão sumarizadas na figura 7 abaixo.

Figura 7 - Fluxograma das etapas de processamento dos dados que foram empregadas para as linhas de radar F, H e J.



Fonte: O Autor.

## 9. RESULTADOS E DISCUSSOES

### LINHA F

O radargrama dos dados brutos apresentou sinal visível de 1 a 2,5 metros de profundidade. A partir dos 2,5 m até a profundidade de 5 m há um efeito de atenuação do sinal com reflexões incipientes. Nas profundidades superiores aos 5 m, nota-se uma ausência efetiva do sinal (Figura 8A).

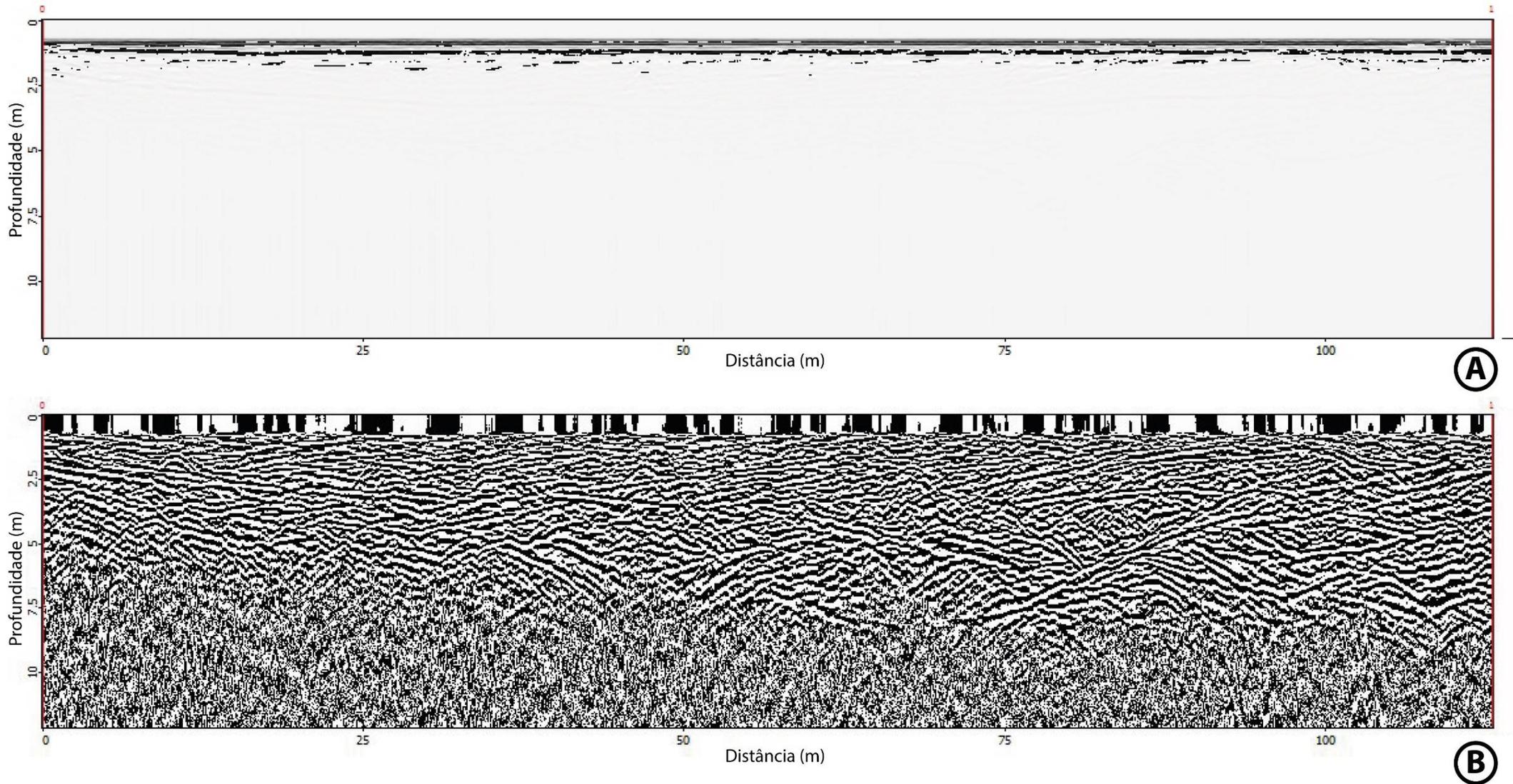
A partir da aplicação do filtro *background removal*, as ondas subaéreas foram removidas e as reflexões de radar anteriormente quase invisíveis tornaram-se evidentes. A partir dos 7,5 m de profundidade não há uma penetração efetiva do sinal, provavelmente em decorrência do grau de saturação em água dos sedimentos ou a presença de substrato rochoso (Figura 8B).

### LINHA H

O radargrama dos dados brutos apresentou sinal visível de 1 a 2,5 metros de profundidade, e reflexões incipientes de 2,5 a cerca de 3 m de profundidade. Nas profundidades superiores a 3 m existe uma atenuação efetiva do sinal, com a ausência total de reflexões visíveis (Figura 9A).

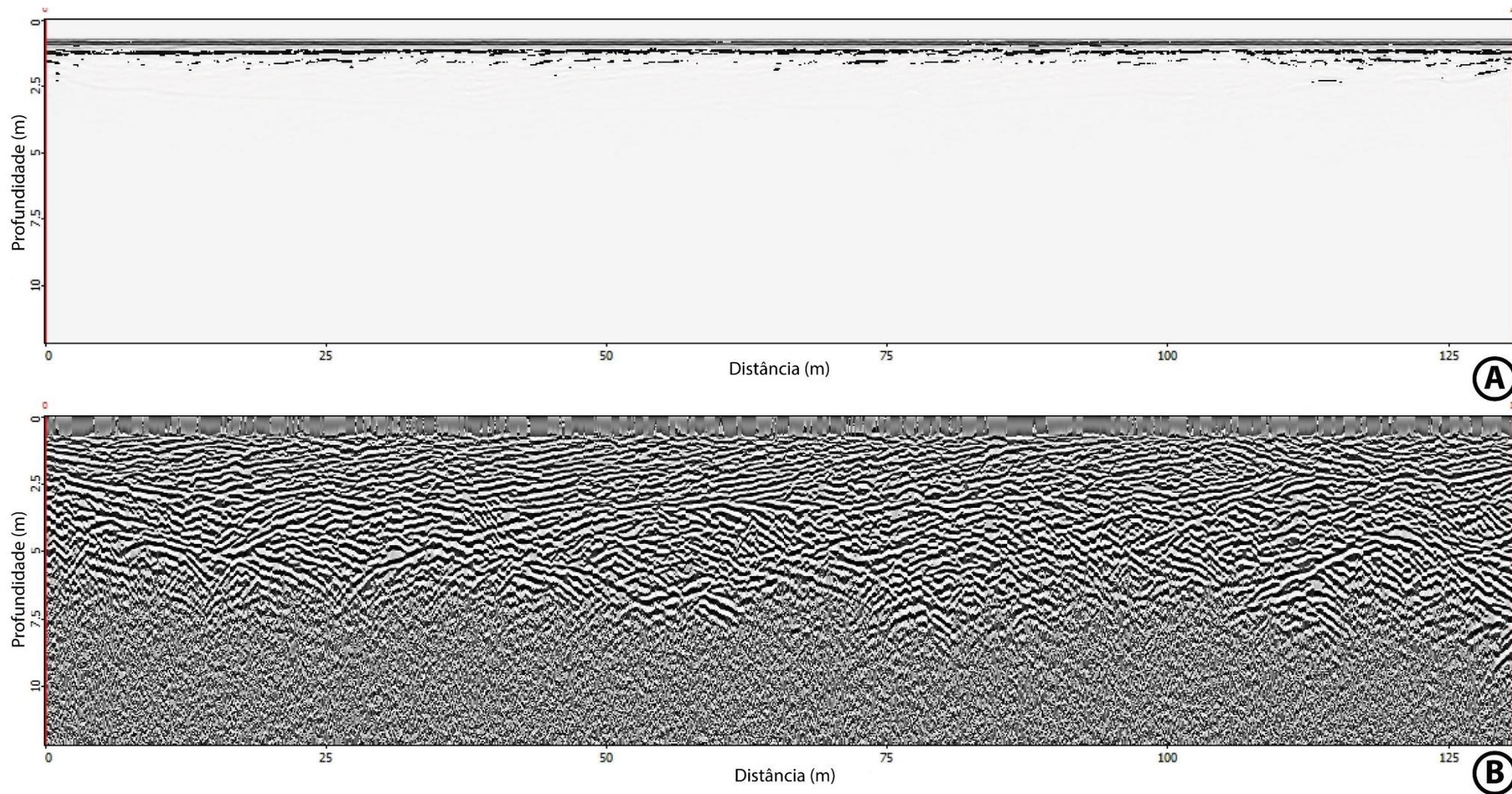
O filtro de *background removal* fez a remoção das ondas subaéreas e as reflexões de radar anteriormente quase invisíveis fizeram-se visíveis. Analogamente à linha F, há uma ausência de sinal a partir dos 7,5 m de profundidade. (Figura 9B).

Figura 8 - Em (A) se é mostrado o radargrama dos dados brutos, e em (B) o radargrama após a aplicação do filtro *background removal* da linha F, respectivamente.



Fonte: O Autor.

Figura 9 - Em (A) se é mostrado o radargrama dos dados brutos, e em (B) o radargrama após a aplicação do filtro *background removal* da linha H, respectivamente



Fonte: O Autor.

## LINHA J

O radargrama dos dados brutos apresentou sinal visível de 1 a 1,5 metros de profundidade. A partir dos 2,5 m até a profundidade de 4 m há um efeito de atenuação do sinal com reflexões pouco visíveis. Nas profundidades superiores aos 5 m, nota-se uma efetiva ausência de sinal (Figura 11A).

A partir da aplicação do filtro *background removal*, as ondas subaéreas foram removidas e as reflexões de radar anteriormente quase invisíveis tornaram-se mais evidentes. A partir dos 7,5 m de profundidade não há uma penetração efetiva do sinal, provavelmente em decorrência do grau de saturação em água dos sedimentos ou a presença de substrato rochoso (Figura 11B).

A partir da aplicação dos filtros passa-banda trapezoidais foram-se eliminadas as frequências (ruídos aleatórios) indesejadas captadas durante a aquisição dos dados. Na figura 10 a seguir são apresentados os valores das respectivas frequências de corte utilizadas para a aplicação dos filtros. As imagens filtradas e suavizadas resultantes são mostradas na figura 12, este procedimento foi feito em todas as 3 linhas.

Figura 10 - Em (A) se é mostrado a frequência de corte para a linha F; em (B) a frequência de corte para a linha H, e (C) a frequência de corte para a linha J.

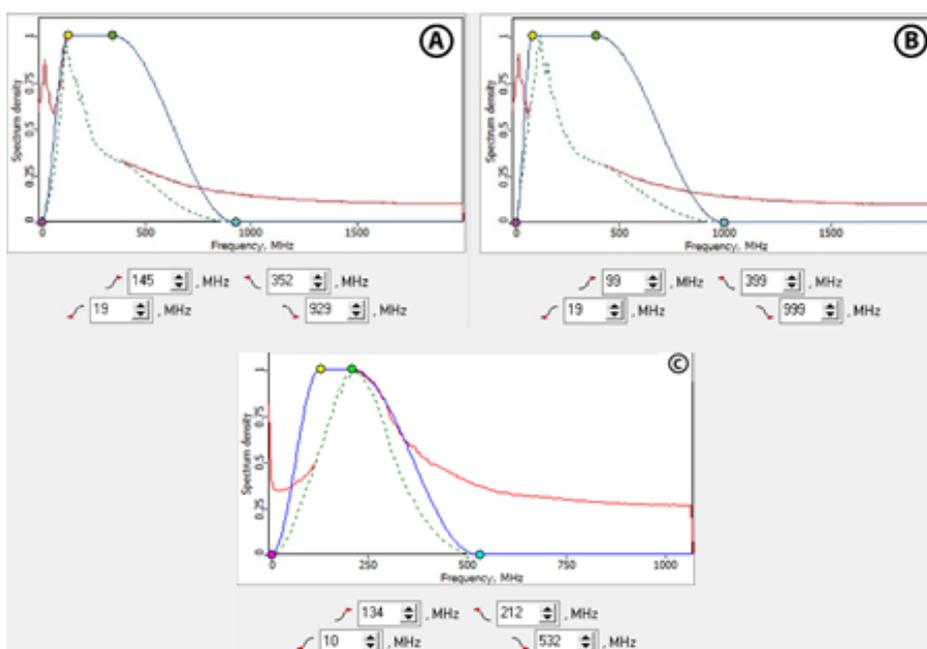
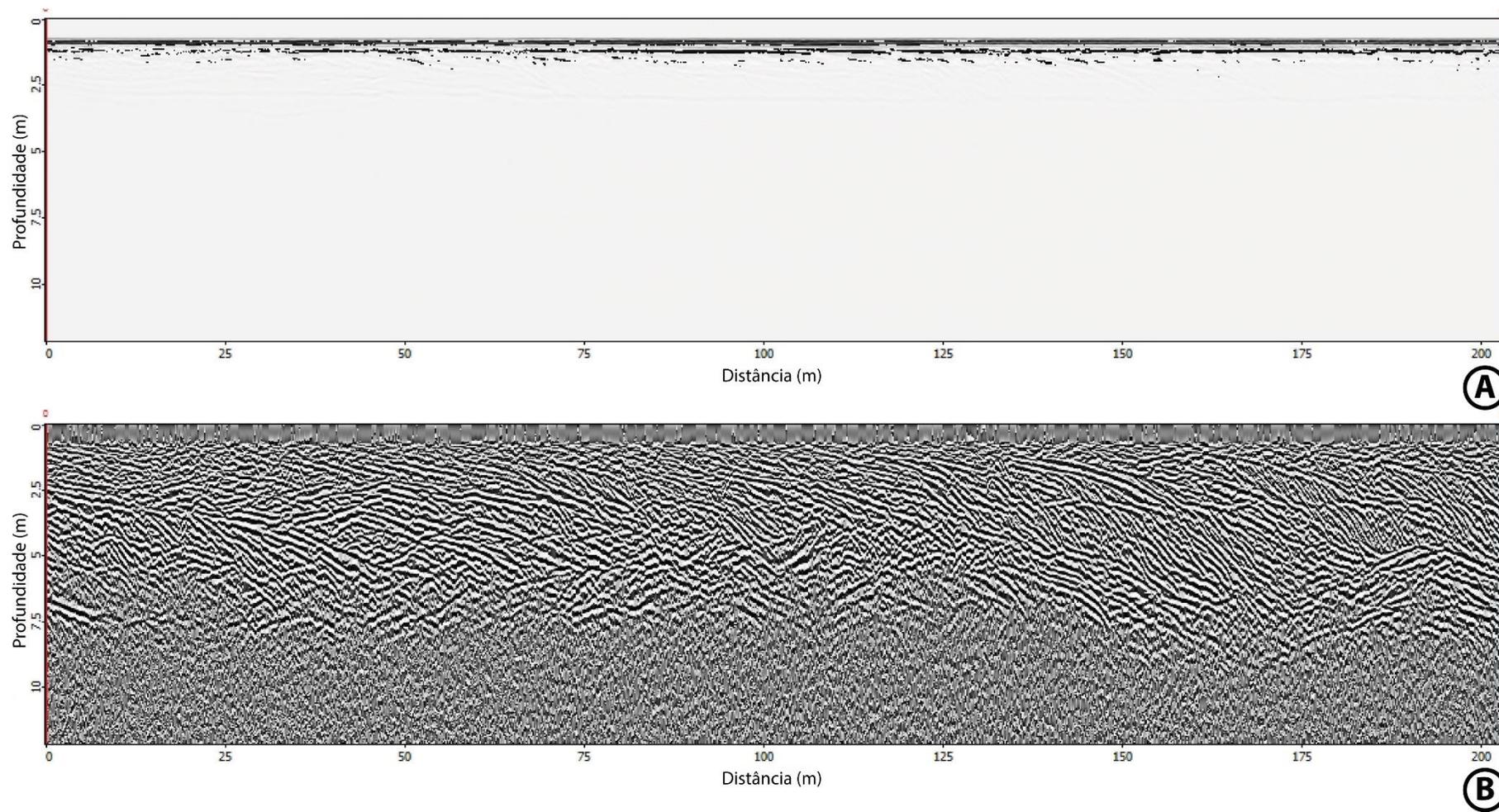
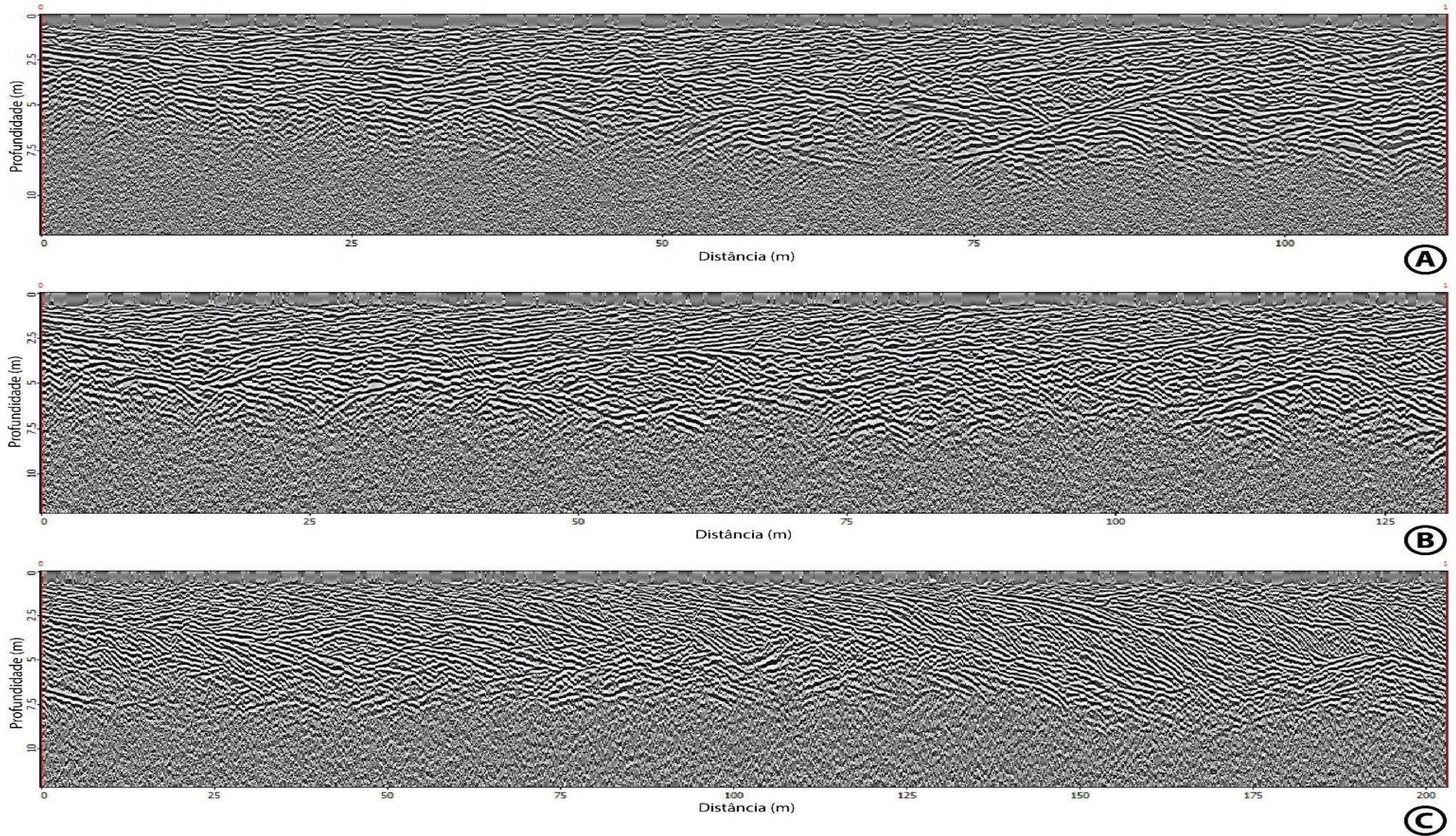


Figura 11 - Em (A) se é mostrado o radargrama dos dados brutos, e em (B) o radargrama após a aplicação do filtro *background removal* da linha J, respectivamente



Fonte: O Autor

Figura 12 imagens filtradas e suavizadas das linhas H, J e F



Fonte: O Autor

A fim de se melhorar a visualização dos dados filtrados, foi-se dado um ganho exponencial e também realizado um corte dos traços de radar para alinhadas F, H e J (Figura 13).

## RADARFÁCIES

A partir da otimização da visualização dos radargramas obtidos nas etapas anteriores, foi-se possível realizar a interpretação e reconhecimento das geometrias e feições deposicionais para as linhas F, H E J. Os critérios utilizados para a análise arquitetural seguiram a proposta de Park (2013) e foram adaptados para as radarfácies.

### FÁCIES 1

Essa radarfácies é constituída por reflexões do tipo cliniformas, e cujos refletores apresentam mergulho suave da direção longitudinal à barra. Essas geometrias deposicionais são interpretadas com formas de leito de acreção frontal (Figura 16).

### FÁCIES 2

Essa radarfácies é constituída por reflexões paralelas a subparalelas de baixo ângulo e mergulho suave. Tais geometrias podem ser interpretadas como depósitos em lençóis (Figuras 14, 15 e 16).

### FACIES 3

A radarfácies 3 é constituída por reflexões caóticas, pouco contínuas e de base erosiva, interpretadas como preenchimento de canais cascalhosos (Figuras 14, 15 e 16).

## FÁCIES 4

Essa radarfácies constitui-se por reflexões de alto ângulo e de base erosiva, interpretadas como preenchimento de canal em associação com formas de acreção frontal e base fortemente erosiva. (Figura 16).

## FÁCIES 5

Essa radarfácies é marcada por reflexões do tipo hipérbole, geralmente ocorrendo de formas dispersas nas linhas. Essas reflexões podem ser interpretadas como depósitos residuais cascalhosos ou seixos esparsos da superfície da barra fluvial (Figura 16).

### RADARFÁCIES



Fácies 1. Reflexões tipo cliniformes



Fácies 2. Reflexões subparalelas de baixo ângulo e mergulho suave



Fácies 3. Reflexões caóticas de preenchimento de canal

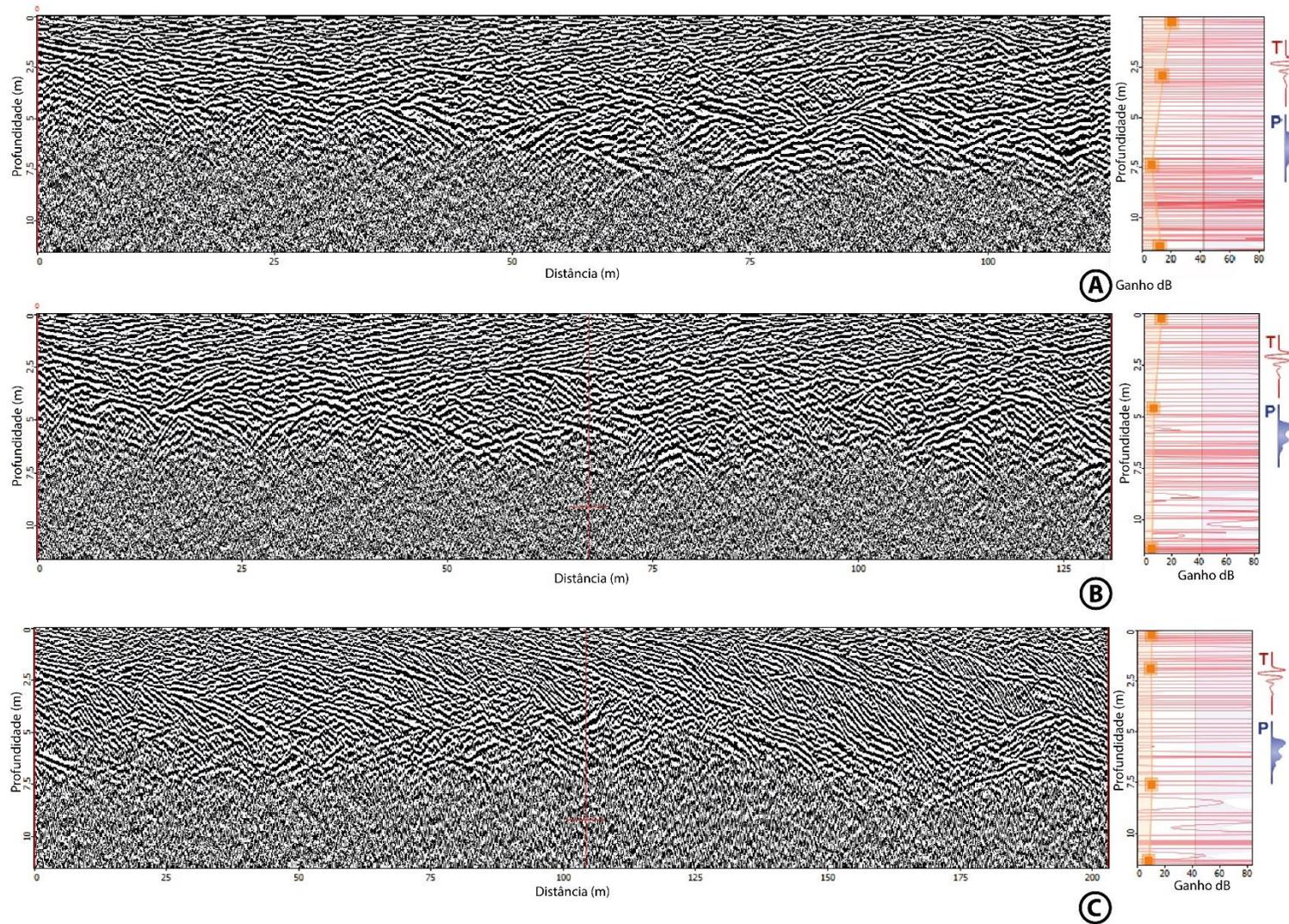


Fácies 4. Reflexões de preenchimento de canal de alto ângulo.



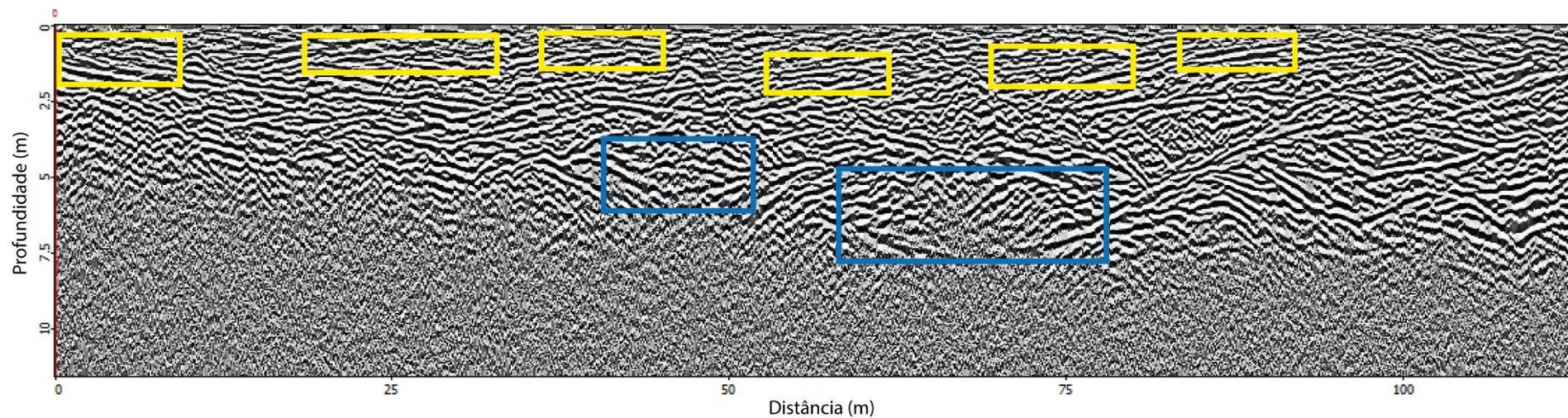
Fácies 5. Reflexões tipo hipérboles

Figura 13 - Radargramas mostrando os valores aplicados para os ganhos exponenciais e corte dos traços para as linhas F (A), H (B) e J (C), respectivamente.

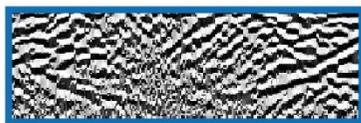


Fonte: O Autor

Figura 14 - Radargrama mostrando a localização das radarfácies 2 e 3 interpretadas para a Linha F.



## RADARFÁCIES



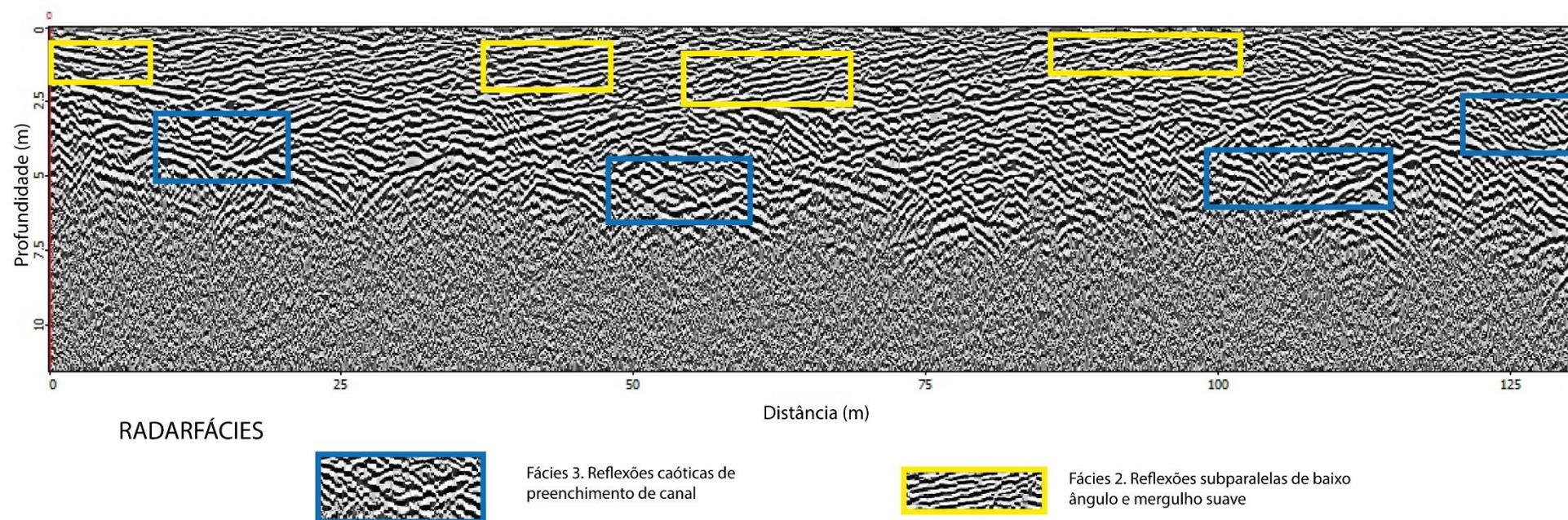
Fácies 3. Reflexões caóticas de preenchimento de canal



Fácies 2. Reflexões subparalelas de baixo ângulo e mergulho suave

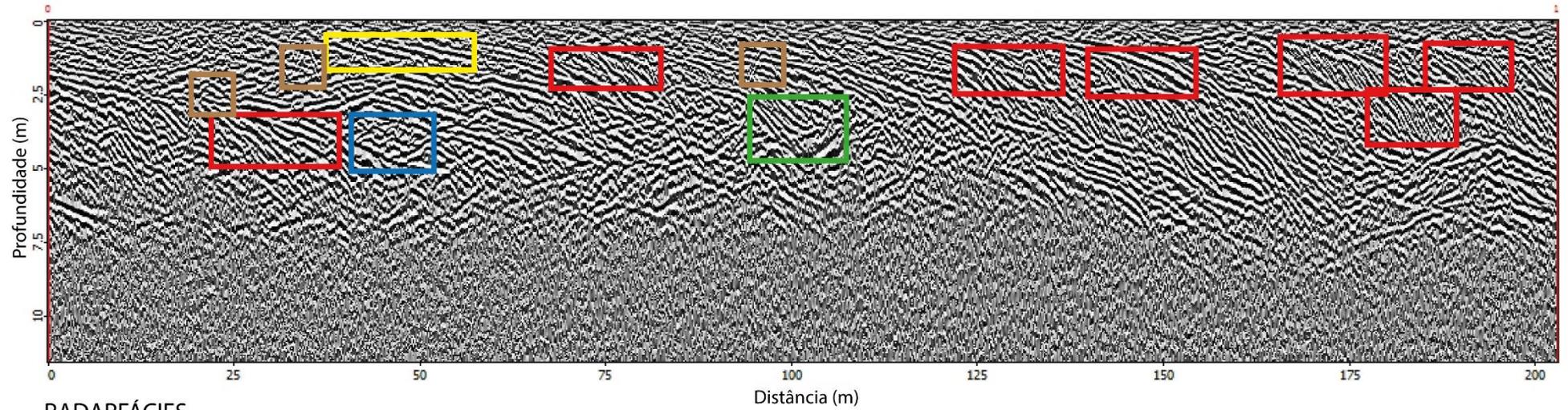
Fonte: O Autor

Figura 15 - Radargrama mostrando a localização das radarfácies 2 e 3 interpretadas para a Linha H.



Fonte: O Autor

Figura 16 - Radargrama mostrando a localização das radarfácies 1,2, 3, 4 e 5 interpretadas para a Linha J.



#### RADARFÁCIES



Fácies 1. Reflexões tipo clinoformas



Fácies 3. Reflexões caóticas de preenchimento de canal



Fácies 5. Reflexões tipo hipérboles



Fácies 2. Reflexões subparalelas de baixo ângulo e mergulho suave



Fácies 4. Reflexões de preenchimento de canal de alto ângulo.

Fonte: O Autor

## 10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A rotina de processamento para as linhas de radar implementada mostrou-se eficaz para os dados da barra fluvial do Rio Camaquã utilizados no presente trabalho. Após a aplicação de filtros e ganhos nas linhas de radar, a qualidade de visualização gráfica das reflexões de subsuperfície foram otimizadas substancialmente.

A partir da análise dos radargramas, foi-se possível individualizar 5 radarfácies e suas geometrias deposicionais relacionadas: (i) tipo cliniformas, associadas à formas de leito de migração frontal da barra; (ii) tipo subparalela de baixo ângulo, interpretadas como depósitos em lençol, ou superfícies de migração lateral da barra, (iii) tipo caótica de preenchimento de canal, associadas a depósitos cascalhosos, (iv) reflexões de preenchimento de alto ângulo, associados à preenchimento de canais por formas de acresção frontal , e (v) tipo hipérboles, associados à depósitos cascalhos da barra fluvial.

Como sugestão futura, se é aconselhado aplicar a mesma grade de processamento para outras aquisições de dados de radar em barras fluviais.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R.E. **Princípios do método GPR**. São Paulo, 2001

BALANIS, C. A. **Advanced Engineering electromagnetics**. New York: Wiley, 1989. 981 p.

BEST, J.L., ASHWORTH, P.J., BRISTOW, C.S., RODEN, J.. **Threedimensional sedimentary architecture of a large, mid-channel sand braid bar, Jamuna River, Bangladesh**. J. Sediment. Res. 73, 516–530. (2003).

BRIDGE, J.S., ALEXANDER, J., COLLIER, R.E.L., GAWTHORPE, R.L., JARVIS, J. **Ground- penetrating radar and coring used to study the large-scale structure of pointbar deposits in three dimensions**. Sedimentology 42, 839–852. (1995).

BRISTOW, C.S., SKELLY, R.L., ETHERIDGE, F.G.. **Crevasse splays from the rapidly aggrading, sand-bed, braided Niobrara River, Nebraska: effect of base-level rise**. Sedimentology 46, 1029– 1047. (1999).

BRISTOW, C.S., BEST, J.L., ASHWORTH, P.J.. **The use of GPR in developing a facies model for a large sandy braided river, Brahmaputra River, Bangladesh**. In: Noon, D.A., Stickley, G.F., Longstaff, D. (Eds.), Proceedings of the Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar. SPIE, Billingham, vol. 4084, pp. 95– 100. (2000).

GRIFFITHS, D. J. **Introduction to electrodynamics**. 3rd. ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1999.

JOL, HARRY M. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**, Elsevier. University of Wisconsin - Eau Claire: USA, 2009.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; IAN, Hill. **Geofísica de exploração**. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de textos, 2009. 438 p. Original inglês.

NEAL, Adrian. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth-Sciences Reviews**. 2004.

OLHOEFT, G.R. Maximizing the information return from ground penetrating radar. **Journal of Applied Geophysics**, Vol. 43, p.175-187. 2000.

PARKER, N.O.; SMITH, G.H.; ASHWORTH, P.J.; BEST, J.L.; LANE, S.N.; LUNT, I.A.; SIMPSON, C.J.; and THOMAS, R.E. **Quantification of the relation between surface morphodynamics and subsurface sedimentological product in sandy braided rivers**. In: *Sedimentology*, v. 60, 820–839. (2013).

PORSANI, J.L. **Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP**. DSc Thesis, Instituto de Geociências da UNESP, Campus de Rio Claro-SP, Brasil, 1999.

REESINK, A.J.H.; ASHWORTH, P.J.; GREGORY H.; SMITH, S.; BEST, J.L.; PARSONS, D.R.; AMSLER, M.; HARD, R.J.; LANE, S.; NICHOLAS, A.P.; ORFEO, O.; SANBACH, S.; SIMPSON, C.J.; and SZUPIANY, R.N. **Scales and causes of heterogeneity in bars in a large multi-channel river: Rio Paraná, Argentina**. In: *Sedimentology*, v. 61, 1055–1085. (2014).

SILVA, A. J. C. L. P.; ARAGÃO, M. A. N. F.; MAGALHÃES, A. J. C. (Eds.). **Ambientes de Sedimentação Siliciclástica do Brasil**. São Paulo, São Paulo, Beca-BALL Edições, 343 p. 2008.